



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA  
TEMPURUNG KELAPA PADA *FLUIDIZED BED*  
*COMBUSTOR* UNIVERSITAS INDONESIA DENGAN  
PARTIKEL *BED* BERUKURAN *MESH 40-50***

**SKRIPSI**

**ALWIN NURMAN**

**0706266840**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**JULI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA  
TEMPURUNG KELAPA PADA *FLUIDIZED BED*  
*COMBUSTOR* UNIVERSITAS INDONESIA DENGAN  
PARTIKEL *BED* BERUKURAN *MESH 40-50***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**ALWIN NURMAN**

**0706266840**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**JULI 2011**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

### **STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA TEMPURUNG KELAPA PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS INDONESIA DENGAN PARTIKEL BED BERUKURAN MESH 40-50**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi sarjana teknik pada program studi Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia. Sejauh yang saya ketahui skripsi ini bukan tiruan atau duplikasi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di perguruan tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 4 Juli 2011



**ALWIN NURMAN**

NPM : 0706266840

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Alwin Nurman  
NPM : 0706266840  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN  
BIOMASSA TEMPURUNG KELAPA PADA  
FLUIDIZED BED COMBUSTOR UNIVERSITAS  
INDONESIA DENGAN PARTIKEL BED  
BERUKURAN MESH 40-50

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima  
sebagai bagian dari persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar  
Sarjana Teknik pada Program Studi, Teknik Mesin Fakultas Teknik,  
Universitas Indonesia**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng

Penguji : Prof. Dr. I Made K Dhiputra Dipl.-Ing

Penguji : Dr. Ir. H. R. Danardono AS, DEA. PE

Penguji : Prof. Ir. Yulianto Sulistyono, M.Sc., Ph.D

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2011

## KATA PENGANTAR DAN UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada ALLAH SWT, karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan, bimbingan serta motivasi dari berbagai pihak maka sangatlah sulit bagi saya untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh Karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ayah dan Ibu tercinta, Ir. Erman Azis M.Sc dan Ir. Nurni Herawati yang telah memberikan pengertian, perhatian serta kasih sayangnya yang begitu besar kepada saya. serta kakak saya dan kedua adik saya yang selalu menjadi saudara yang selalu mendukung dan menyemangati saya untuk selalu berusaha sebaik mungkin.
2. Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah bersedia untuk meluangkan waktu, tenaga, pikiran dan segala perhatiannya kepada kami sehingga kami selalu termotivasi dan mendapatkan semangat baru untuk dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Saya meminta maaf jika selama ini saya ada kesalahan selama masa bimbingan ini.
3. Mas Syarif dan Mas Boan yang sudah meluangkan banyak waktu dan tenaga di tengah-tengah kesibukannya untuk dapat membantu kami dalam melaksanakan penelitian ini.
4. Seluruh teman seperjuangan skripsi saya, Adhika A. Tama, A Nur Latif dan Satriawan Wiguna, yang telah bercanda tawa, suka-duka, senang dan sedih bersama selama pengerjaan skripsi. Terima kasih untuk kalian semua yang sudah banyak membantu dalam pengerjaan skripsi ini.
5. Dr. Ir Muhammad Idrus Alhamid yang dengan penuh ketulusan telah membantu kami dalam pembuatan distributor baru *Fluidized Bed Combustor* UI. Semoga kebaikan Bapak akan tergantikan berlipat ganda dan semakin sukses kedepannya.

6. Seluruh dosen, staf pengajar dan karyawan DTM FTUI yang secara langsung atau tidak langsung memberikan pelajaran, wawasan dan informasi yang tak ternilai harganya.
7. Preta Vania Kartika Putri yang selama ini telah memberikan kasih sayang dan perhatian yang sangat besar kepada saya. Serta telah dengan sabar memberikan semangat agar saya dapat menyelesaikan skripsi ini.
8. Seluruh teman-teman saya yang banyak sekali mendukung saya baik secara langsung maupun tidak langsung. Gilang AIV, Sabdo Waluyo, Iman Rizki Utama, Hamdalah Hazhar, Kapa Cossa Jonahntan, M fariz Isnaini, M iqbal Bimo, Rian Saputra dan masih banyak lagi. Teman-teman dari Pondok Afrika dan Kuda Hitam. Terima kasih untuk semuanya.
9. Seluruh pihak yang tidak dapat saya ucapkan satu persatu. Saya ucapkan terima kasih banyak atas segala hal yang begitu berarti dalam setiap perjalanan hidup saya.

Akhir kata, saya berharap ALLAH SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bisa membawa manfaat bagi kita semua pada khususnya dan pengembangan ilmu pengetahuan pada umumnya.

Depok, 4 Juli 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Alwin Nurman

NPM : 0706266840

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**STUDI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOMASSA  
TEMPURUNG KELAPA PADA FLUIDIZED BED COMBUSTOR  
UNIVERSITAS INDONESIA DENGAN PARTIKEL BED  
BERUKURAN MESH 40-50**

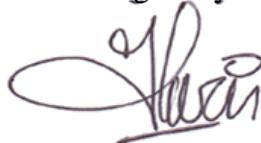
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 4 Juli 2011

Yang menyatakan,



(Alwin Nurman)

## ABSTRAK

Nama : Alwin Nurman  
Npm : 0706266840  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa Tempurung Kelapa  
Pada *Fluidized Bed Combustor* Universitas Indonesia Dengan  
Partikel *Bed* Berukuran *Mesh* 40-50

Seiring dengan terus menipisnya cadangan minyak bumi yang selama ini menjadi sumber daya energi di seluruh dunia telah melahirkan banyak teknologi pengkonversi sumber daya alam terbarukan sebagai upaya penekanan pemakaian minyak bumi. Salah satu teknologi tersebut adalah *Fluidized Bed Combustor* (FBC). Alat ini berfungsi mengubah energi biomassa menjadi energi panas yang dapat dimanfaatkan. Alat ini bekerja memanfaatkan hampan pasir yang difluidisasikan menggunakan udara bertekanan. Hampan pasir yang terfluidisasi ini berfungsi sebagai sarana penyimpan dan pendistribusi panas yang baik. Temperatur pengoperasian *fluidized bed combustor* berada pada 600-900°C sehingga bahan bakar dapat terbakar menjadi abu dan rendah polusi. Pasir memegang peranan penting dalam pengoperasian FBC. Untuk itu dilakukan pengujian pada FBC UI menggunakan hampan pasir *mesh* 40-50 dengan variasi massa *feeding* tempurung kelapa 1 kg, 1,25 kg, 2 kg pada kondisi kerja. Didapat hasil *feeding* terbaik adalah 2 kg dengan temperatur *bed* rata-rata sebesar 656,71°C

Kata kunci: *Fluidized Bed Combustor*, hampan pasir, *bed*, biomassa, tempurung kelapa.

## ABSTRACT

Name : Alwin Nurman

NPM : 0706266840

Study Program : Mechanical Engineering

Title : Study Of Coconut Shell Biomass Combustion Characteristics  
Using Bed With 40-50 Mesh Rate Sand Particle On Fluidized Bed  
Combustor In University Of Indonesia.

The depletion of the fossil energy reserves, which has been our main energy source for many years, has led to the emerge of many new technologies that converts renewable energy into heat which can be used in power plant in order to suppress the fossil energy usage. One of those technologies is called Fluidized Bed Combustor (FBC). This technology is used to convert biomass energy into heat energy. FBC uses a bed of sand which is fluidized by an upward-flowing pressurized air. The fluid-like bed can store and distribute heat well. The operating temperature of an FBC is around 600-900°C, so it can burn fuels into ash and has low pollution. Sand plays an important role in FBC operation. A test was conducted using a bed of 40-50 mesh rate sand with variations of coconut shell feeding, 1 kg, 1,25 kg and 2 kg at operating state. The best feeding obtained at 2 kg, with average bed temperature is 656,71°C.

Key word : Fluidized bed combustor, bed, Biomass, Coconut shell.

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMBUNG.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR DAN UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Judul Penelitian.....	1
1.2. Latar Belakang Masalah.....	1
1.3. Perumusan Masalah.....	4
1.4. Tujuan Penelitian.....	4
1.5. Batasan Masalah.....	5
1.6. Metodologi Penelitian.....	5
1.7. Sistematika Penulisan.....	6
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	8
2.1 Energi Biomassa.....	8
2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa.....	8
2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa.....	9
2.2 Karakteristik Biomassa.....	15
2.3 Sistem Reaksi Pembakaran.....	18
2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran.....	19
2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran.....	20
2.4 <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	23
2.4.1 Jenis-Jenis Fluidized Bed Combustor.....	26

2.4.2	Pinsip Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	27
2.4.3	Bagian-Bagian Fluidized Bed Combustor .....	28
2.5	Fenomena Fluidisasi.....	38
2.5.1	Proses Fluidisasi.....	38
2.5.2	Kondisi Fluidisasi.....	39
2.5.3	Jenis-Jenis Fluidisasi .....	41
2.5.4	Parameter-Parameter Fluidisasi.....	42
BAB 3 PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN .....		52
3.1	Metodologi Penelitian .....	52
3.1.1	Review Kinerja FBC.....	53
3.1.2	Studi Literatur .....	53
3.1.3	Modifikasi Desain dan Alat.....	53
3.1.4	Pengujian Pembakaran & Pengambilan Data .....	53
3.1.5	Perbandingan Data & Analisa.....	54
3.2	Persiapan Pengujian .....	54
3.2.1	Bahan Bakar Biomassa .....	54
3.2.2	Pasir.....	56
3.2.3	Perlengkapan dan Peralatan .....	60
3.3	Standar Operasi Alat Pengujian .....	63
3.3.1	Sistem Feeder .....	63
3.3.2	Blower .....	65
3.3.3	Sistem <i>Burner</i> .....	67
3.4	Prosedur Pengujian Pembakaran.....	70
3.4.1	Rangkaian Alat Pengujian .....	70
3.4.2	Prosedur Pengambilan Data Pembakaran .....	72
BAB 4 HASIL DATA DAN ANALISA.....		74

4.1 Hasil .....	74
4.1.1. Hasil pembakaran dengan hampan pasir <i>mesh</i> 30 .....	74
4.1.2. Hasil Pembakaran dengan hampan pasir <i>mesh</i> 40-50.....	75
4.2 Analisa.....	75
4.2.1 Sebelum Kondisi Kerja .....	76
4.2.2 Analisa Saat Kondisi Kerja .....	78
4.2.3 Pembakaran biomassa pada kondisi kerja.....	81
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	89
5.1 Kesimpulan .....	89
5.2 Saran.....	90
DAFTAR PUSTAKA .....	91
LAMPIRAN.....	93

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Chart Teknologi Konversi Biomassa.....	9
Gambar 2.2 <i>Direct Combustor</i> .....	10
Gambar 2.3 <i>Proses Gasifikasi (sumber : <a href="http://www.w3.org">http://www.w3.org</a>)</i> .....	11
Gambar 2.4 <i>Anaerobic Digester</i> .....	13
Gambar 2.5 <i>Rangkaian Instalasi Biogas</i> .....	13
Gambar 2.6 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat .....	16
Gambar 2.7 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat. ....	17
Gambar 2.8 Skematis <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	24
Gambar 2.9 Diagram Proses Pencampuran ( <i>mixing</i> ) dalam <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	25
Gambar 2.10 Tahapan Proses Kerja <i>Fluidized Bed Combustor</i> .....	28
Gambar 2.11 Ruang Bakar Utama <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI.....	29
Gambar 2.12 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor .....	30
Gambar 2.13 Distributor yang Digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI....	31
Gambar 2.14 Jenis-Jenis <i>Solid Flow Control</i> ; (a) <i>Slide Valve</i> (b) <i>Rotary Valve</i> ;..	32
Gambar 2.15 <i>Screw Feeder</i> .....	33
Gambar 2.16 <i>Burner</i> yang digunakan pada <i>Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	34
Gambar 2.17 <i>Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor</i> UI .....	36
Gambar 2.18 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC.....	37
Gambar 2.19 <i>Control Panel</i> .....	37
Gambar 2.20 <i>Data Logger</i> .....	38
Gambar 2.21 Skematik Fluidisasi .....	39
Gambar 2.22 Hubungan Tinggi Hampan Terhadap Kecepatan Superfisial .....	40
Gambar 2.23 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial....	40
Gambar 2.24 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir .....	47
Gambar 2.25 Daerah batas fluidisasi) .....	51
Gambar 3.1 Tempurung kelapa .....	55

Gambar 3.2 Tempurung kelapa partikel kecil .....	56
Gambar 3.3 Pasir silika mesh 40-50 yang digunakan pada FBC UI.....	59
Gambar 3.4 Generator set yang digunakan .....	60
Gambar 3.5 Konfigurasi termokopel: (a). T1 - T3, dan (b). T4 – T5.....	61
Gambar 3.6 <i>Temperature data logger</i> .....	62
Gambar 3.7 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg .....	62
Gambar 3.8 <i>Control panel</i> yang digunakan untuk feeder dan blower .....	63
Gambar 3.9 Sistem feeder pada <i>fluidized bed combustor</i> UI.....	64
Gambar 3.10 Ring blower pada <i>fluidized bed combustor</i> UI.....	66
Gambar 3.11 Bagian-bagian <i>hi-temp premixed burner</i> .....	69
Gambar 3.12 Rangkaian seluruh alat untuk melakukan pengujian pembakaran ..	71
Gambar 4.1 Grafik pembakaran dengan ukuran hamparan <i>mesh</i> 30 .....	74
Gambar 4.2 Grafik pembakaran dengan ukuran hamparan <i>mesh</i> 40-50.....	75
Gambar 4.3 Grafik pemanasan dengan ukuran hamparan <i>mesh</i> 30.....	76
Gambar 4.4 Grafik pemanasan dengan ukuran hamparan <i>mesh</i> 40-50.....	77
Gambar 4.5 Grafik pembakaran pada kondisi kerja dengan ukuran hamparan <i>mesh</i> 30 .....	78
Gambar 4.6 Grafik pembakaran pada kondisi kerja dengan ukuran hamparan <i>mesh</i> 40-50 .....	79
Gambar 4.7 api yang terjadi pada percobaan dengan hamparan pasir <i>mesh</i> 30 .....	80
Gambar 4.8 kondisi kerja percobaan dengan hamparan pasir <i>mesh</i> 40-50 .....	80
Gambar 4.9 grafik distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan <i>feeding</i> 1 kg.....	81
Gambar 4.10 distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan <i>feeding</i> 1,25 kg .....	82
Gambar 4.11 distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan <i>feeding</i> 2 kg .....	83
Gambar 4.12 distribusi temperatur terhadap ketinggian pada kondisi kerja dengan hamparan <i>mesh</i> 30 .....	84
Gambar 4.13 distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan <i>feeding</i> 1 kg dengan hamparan <i>mesh</i> 40-50 .....	85

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Data energi fosil Indonesia.....	2
Tabel 1.2 Potensi energi non fosil Indonesia.....	2
Tabel 2.1 <i>Ultimate Anaysis</i> Beberapa Jenis Biomassa.....	17
Tabel 2.2 <i>Proximate Analysis</i> Beberapa Jenis Biomassa .....	17
Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa .....	18
Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar.....	21
Tabel 2.5 <i>Increasing Size and Density</i> .....	50
Tabel 3.1 Potensi biomassa di Indonesia.....	55
Tabel 3.2 <i>Specific Heat</i> berbagai substansi .....	57
Tabel 3.3 Sifat fisik, termal, dan mekanik pasir silica .....	57
Tabel 3.4 Distribusi ukuran pengayakan pasir silika .....	58
Tabel 3.5 Spesifikasi motor feeder.....	64
Tabel 3.6 Spesifikasi teknis ring blower .....	66
Tabel 3.7 Spesifikasi teknis <i>Hi-Temp Premixed Burner</i> .....	70
Tabel 4.1 Temperatur rata-rata pemanasan 30 menit pertama .....	78
Tabel 4.2 Temperatur rata-rata kondisi kerja .....	79
Tabel 4.3 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 1 kg .....	82
Tabel 4.4 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 1,25 kg .....	82
Tabel 4.5 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 2 kg .....	83
Tabel 4.6 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 1 kg dengan hamparan <i>mesh</i> 40-50.....	85
Tabel 4.7 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 1,25 kg dengan hamparan <i>mesh</i> 40-50....	86
Tabel 4.8 Temperatur rata-rata <i>feeding</i> 2 kg dengan hamparan <i>mesh</i> 40-50.....	87

## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1. Judul Penelitian

Studi Karakteristik Pembakaran Biomassa Tempurung Kelapa Pada Fluidized Bed Combustor Universitas Indonesia Dengan Partikel *Bed* Berukuran *Mesh* 40-50

#### 1.2. Latar Belakang Masalah

Kebutuhan akan energi saat ini telah menjadi sesuatu yang tidak dapat dipisahkan dari kehidupan manusia di seluruh dunia. Hampir semua sektor industri membutuhkan energi sehingga pertumbuhan ekonomi suatu negara juga berkaitan erat dengan ketersediaan sumber energi. Oleh karena itu, permintaan akan energi telah menjadi sesuatu yang substansial dan berkelanjutan. Namun semakin menipisnya cadangan minyak bumi yang selama ini menjadi pilihan utama sumber energi memaksa industri mencari dan mengembangkan teknologi yang dapat meningkatkan efisiensi dan menekan penggunaan bahan bakar yang berbasis minyak bumi. Selain itu pencarian sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui juga menjadi pilihan. Masalah *global warming* juga menjadi tantangan yang harus dihadapi dalam pemilihan energi alternatif.

Saat ini sumber energi terbarukan seperti panas bumi, matahari, angin, biomassa, dan air menjadi pilihan energi yang dapat dieksplorasi. Namun belum semua sumber energi tersebut telah mendapat sentuhan untuk dimanfaatkan secara optimal. Seperti energi tenaga angin, matahari dan biomassa yang masih dalam tahap kajian karena keterbatasan biaya, investasi dan teknologi yang tersedia.

Tabel 1.1 Data energi fosil Indonesia

(sumber: dari berbagai sumber)

ENERGI FOSIL	CADANGAN TERBUKTI	PRODUKSI TAHUNAN	RASIO CADANGAN/PRODUKSI
Minyak	4,3 miliar barel	350 juta barel	12,3 tahun
Gas	2,63 triliun m <sup>3</sup>	74 miliar m <sup>3</sup>	35,5 tahun
Batu bara	5,3 miliar ton	200 juta ton	26,5 tahun

Tabel 1..2 Potensi energi non fosil Indonesia

(sumber: Ditjen LPE – DESDM tahun 2008)

ENERGI NON FOSIL (TERBARUKAN)	POTENSI	KAPASITAS PEMBANGKIT YANG SUDAH TERPASANG
Tenaga air	76,7 GW	4200 MW
Panas bumi (Geothermal)	27 GW	1042 MW
<i>Mini/Micro Hydro</i>	712 MW	206 MW
Biomass	49,81 GW	445 MW
Matahari	4,8 kWh/m <sup>2</sup> /hari	8 MW
Angin	3-6 m/detik ( <i>speed</i> )	0,6 MW

Berdasarkan data di atas, cadangan terbukti, yaitu kuantitas energi yang berdasarkan data geologis dan kemampuan teknologi yang ada saat ini dapat diangkat atau diproduksi ke permukaan, baik minyak bumi, gas dan batu bara, bila dibagi dengan produksi tahunan terakhir akan habis dalam 12,5 tahun, 35,5 tahun dan 26,5 tahun. Sedangkan pada data potensi energi non fosil di Indonesia, energi

biomassa mempunyai potensi tertinggi kedua di bawah energi air, yaitu sebesar 49,81 Giga Watt. Namun kapasitas pembangkit yang sudah terpasang baru sekitar 445 Mega Watt, atau baru sekitar 0,9 % dari seluruh potensi energi yang tersedia. Hal ini tentu masih harus ditingkatkan, mengingat banyaknya keunggulan yang dimiliki oleh energi biomassa dibandingkan dengan energi lainnya. Selain memang sifatnya yang dapat diperbaharui secara terus menerus, juga lebih ramah terhadap lingkungan. Emisi yang dikeluarkan lebih rendah, terutama gas karbondioksida sehingga mampu mengurangi efek rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global. Energi biomassa menjadi penting bila dibandingkan dengan energi terbarukan karena proses konversi menjadi energi listrik memiliki investasi yang lebih murah bila dibandingkan dengan jenis sumber energi terbarukan lainnya. Hal inilah yang menjadi kelebihan biomassa dibandingkan dengan energi lainnya.

Pemanfaatan biomassa biasanya dilakukan dengan cara membakarnya sehingga menghasilkan kalor yang nantinya digunakan untuk memanaskan boiler. Uap yang dihasilkan dari pemanasan tersebut kemudian ditransfer ke dalam turbin. Putaran turbin tersebut akan menggerakkan generator. Namun pembakaran biomassa secara langsung memiliki kelemahan yakni efisiensi yang dihasilkan sangat rendah.

Beberapa teknologi telah dikembangkan untuk dapat meningkatkan efisiensi penggunaan biomassa sebagai bahan bakar. Selain kemampuan untuk meningkatkan efisiensi, teknologi tersebut haruslah dapat mengurangi gangguan terhadap lingkungan. Salah satu teknologi yang diharapkan dapat memecahkan permasalahan tersebut dan terus berkembang adalah *Fluidized Bed Combustor*.

*Fluidized Bed Combustor (FBC)* merupakan salah satu teknologi pembakaran yang mempunyai keunggulan mengkonversi berbagai jenis bahan bakar baik sampah, limbah, biomassa ataupun bahan bakar fosil berkalori rendah. Teknologi ini menggunakan konsep turbulensi benda padat yang terjadi pada proses pembakaran, dimana dalam mekanisme pembakarannya tersebut terjadi perpindahan panas dan massa yang tinggi. Teknologi ini telah diperkenalkan sejak abad keduapuluhan dan telah diaplikasikan dalam banyak sektor industri dan pada

tahun-tahun belakangan ini telah diaplikasikan untuk mengkonversi biomassa menjadi energi.

*Fluidized bed combustor* memiliki bentuk seperti sebuah tungku pembakar biasa, namun memiliki media pengaduk berupa pasir. Pasir yang digunakan bisa pasir kuarsa ataupun pasir silika. Fungsi pasir ini berfungsi sebagai penyimpan dan pendistribusi panas, sehingga panas yang dihasilkan dapat merata. *Fluidized bed combustor* memiliki temperatur pengoperasian antara 600 sampai 900°C sehingga bahan bakar seperti limbah dapat habis terbakar hingga menjadi abu yang tidak berbahaya bagi lingkungan.

Teknologi ini dapat menjadi salah satu teknologi pembakaran limbah partikel atau padatan dalam jumlah yang relatif besar secara cepat. Emisi yang dihasilkan pembakaran juga relatif kecil sehingga menekan polusi udara yang mungkin timbul akibat pembakaran yang kurang sempurna. Teknologi *fluidized bed combustor* ini juga lebih baik bila dibandingkan dengan teknologi pembakaran biomassa yang konvensional, karena laju pembakaran yang cukup tinggi, dan juga dapat membakar limbah biomassa yang berkadar air tinggi. Namun masih ada beberapa kelemahannya seperti kurangnya penelitian yang dilakukan terhadap teknologi *fluidized bed combustor* ini di Indonesia.

### **1.3. Perumusan Masalah**

*Fluidized Bed Combustor* di Universitas Indonesia merupakan unit pemanfaatan limbah yang masih dalam pengembangan. Berdasarkan pengalaman pengujian di laboratorium, terdapat kesulitan-kesulitan yang dapat diidentifikasi, yaitu masalah pemanasan awal *bed* yang masih cukup lama akibat terlalu jauhnya jarak *burner* dengan permukaan *bed* serta fluidisasi *bed* yang kurang merata akibat tidak meratanya tekanan pasokan udara yang melalui distributor. Selain itu diperlukan juga pengujian dengan bahan bakar biomassa tempurung kelapa. Tujuannya untuk mengetahui kualitas dan karakteristik pembakaran dengan bahan bakar tersebut.

### **1.4. Tujuan Penelitian**

Sesuai perumusan masalah yang telah diuraikan di atas, maka tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui karakteristik fluidisasi pada *bed* dengan menggunakan distributor yang telah dimodifikasi.
2. Mengetahui pengaruh ukuran partikel pasir yang digunakan pada *bed*.
3. Mengetahui karakteristik pembakaran tempurung kelapa sawit dengan menggunakan *fluidized bed combustor* yang ada di Universitas Indonesia.

### 1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian yang dilakukan hanya mencakup eksperimental pembakaran yang tujuannya untuk mengetahui karakteristik pembakaran dengan bahan bakar biomassa (pemanasan awal serta *self sustained combustion*). Sedangkan penghitungan nilai *heat rate* output dari proses pembakaran, perhitungan efisiensi alat serta emisi gas buang yang dihasilkan tidak akan dibahas secara mendalam dalam tulisan ini.
2. Bahan bakar biomassa yang digunakan pada pemanasan awal dan pada *self sustained combustion* adalah Tempurung kelapa.
3. Perbandingan dilakukan menggunakan *bed* dengan partikel pasir berukuran mesh 30 dengan partikel pasir berukuran mesh 40-50.

### 1.6. Metodologi Penelitian

Metode penulisan yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini dilakukan dengan melalui beberapa tahapan, yaitu:

1. Persiapan
  - 1.1. Identifikasi masalah yang akan dibahas
  - 1.2. Penelusuran literatur
  - 1.3. Pemilihan bahan bakar dan pasir yang akan digunakan serta menentukan ukurannya
2. Set Up Preparation
  - 2.1. Instalasi Laboratorium
  - 2.2. Penentuan dimensi bahan bakar
  - 2.3. Kalibrasi Instrumentasi
  - 2.4. Instalasi Instrumentasi laboratorium

3. Pengujian dan Pengambilan Data
  - 3.1. Pengukuran massa dan ukuran rata-rata setiap jenis bahan bakar sebelum memasuki feeding
  - 3.2. Pengukuran variasi putaran pada blower.
4. Pengolahan Data dan Grafik
  - 4.1. Perhitungan laju aliran massa bahan bakar pada feeding terhadap perubahan temperatur yang dihasilkan.
  - 4.3. Interpretasi grafik perbandingan dari berbagai kondisi dari hasil pengolahan data
5. Analisa dan Kesimpulan
  - 5.1. Menganalisa kestabilan dari proses pembakaran dengan pemasukan bahan bakar yang terkontrol
  - 5.2. Menganalisa korelasi dan pengaruh dari laju aliran massa bahan bakar dan temperatur yang dicapai
  - 5.3. Menarik kesimpulan dari keseluruhan proses penelitian yang dilakukan

### **1.7. Sistematika Penulisan**

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis membagi menjadi lima bab, yang masing-masing terdiri dari sub-bab. Hal tersebut dimaksudkan untuk mempermudah dan mengarahkan pembahasan agar didapatkan informasi secara menyeluruh. Kerangka penulisan tersebut diuraikan sebagai berikut :

- BAB 1           PENDAHULUAN**, berisi :
- Latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.
- BAB 2           TINJAUAN PUSTAKA**, berisi :
- Bab ini berisi dasar-dasar teori yang digunakan mengenai energy biomassa, sistem reaksi pembakaran, fluidized bed combustor, fenomena fluidisasi serta tentang fluidisasi.
- BAB 3           PENGUJIAN DAN PENGUKURAN**, berisi :
- Skematik pengujian, metodologi pengujian, dan metodologi pengambilan data.
- BAB 4           HASIL DAN ANALISA**, berisi :

Pengolahan data hasil perhitungan, grafik–grafik hasil pengukuran, dan analisa hasil perhitungan.

**BAB 5**      **KESIMPULAN DAN SARAN**, berisi :  
Kesimpulan dan saran.



## **BAB 2**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Energi Biomassa**

Energi Biomassa adalah energi yang berasal dari material organik, misalnya tumbuhan dan hewan, oleh karena itu energi ini merupakan bagian dari energi terbarukan. Energi ini juga merupakan energi yang ramah lingkungan karena menghasilkan emisi gas buang yang tidak sebesar emisi gas buang bahan bakar fosil.

Energi Biomassa merupakan salah satu bentuk energi kimia, dimana energi yang terkandung disimpan dalam bentuk ikatan atom dan molekul, energi kimia inilah yang nantinya dapat dikonversikan dan digunakan untuk kesejahteraan manusia.

Contoh dari biomassa adalah hasil pertanian, perkebunan, sampah organik, limbah cair pembuatan tahu, limbah padat dan cair penggilingan tebu, feses hewan ternak, kayu, jerami, dan sebagainya. Macam-macam biomassa ini menggunakan cara yang berbeda untuk mengkonversikan energi yang terkandungnya.

##### **2.1.1 Jenis-Jenis Biomassa**

Biomassa, berdasarkan bentuk dan wujudnya dibagi menjadi 3 kategori, yaitu:

###### **2.1.1.1 Solid Biomassa**

Bahan dasar yang digunakan berasal dari material organik kering seperti misalnya pohon, sisa-sisa tumbuhan, hewan, kotoran manusia, sisa-sisa industri dan rumah tangga, yang kemudian dibakar secara langsung untuk menghasilkan panas. Wilayah penghasil biomassa, secara umum dibagi menjadi 3 daerah geografis, yaitu:

a) *Temperate Regions (wilayah beriklim sedang)*

Menghasilkan kayu, sisa tumbuhan, serta kotoran manusia dan hewan.

b) *Arid and semi – arid Regions (wilayah beriklim kering)*

Menghasilkan sedikit vegetasi untuk sumber energi.

c) *Humid Tropical Regions (wilayah beriklim lembab)*

Menghasilkan persediaan kayu dan sisa – sisa tumbuhan yang sangat berlebih serta kotoran manusia dan hewan.

### 2.1.1.2 Biogas

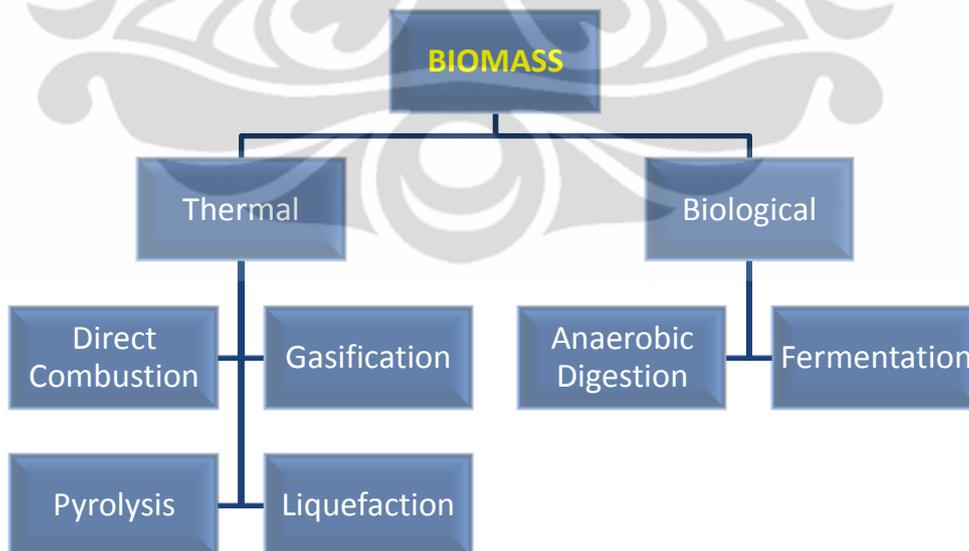
Biogas berasal dari material organik yang telah melewati proses fermentasi atau anaerob digesting oleh bakteri pada koindisi udara kekurangan oksigen yang kemudian menghasilkan gas yang dapat terbakar (combustible gas).

### 2.1.1.3 Liquid Biofuel

Biofuel berasal dari minyak nabati (ethanol) maupun hewani. Biofuel ini didapat dari reaksi kimia dan atau fisika pada material organik. Minyak yang didapat dapat digunakan untuk melakukan pembakaran, sama seperti bahan bakar fosil.

## 2.1.2 Teknologi Pengkonversian Energi Biomassa

Teknologi pengkonversian biomassa bisa diklasifikasikan menjadi dua, yaitu termal dan biologis, seperti ditunjukkan oleh chart berikut.



Gambar 2.1 Chart Teknologi Konversi Biomassa

(Sumber: R. Arya Sutrisno. 2010)

### 2.1.2.1 Proses Thermal

Ada 3 proses pemanasan dalam menghasilkan energi biomassa, yaitu:

#### 1. *Direct Combustor*

Pada proses ini material organik (biomassa) dilakukan pembakaran secara langsung. Agar efisiensi pembakaran baik, dilakukan pengeringan (drying) untuk menghilangkan kadar air pada material organik. Salah satu aplikasi dari direct combustor adalah kompor masak yang menggunakan kayu bakar.

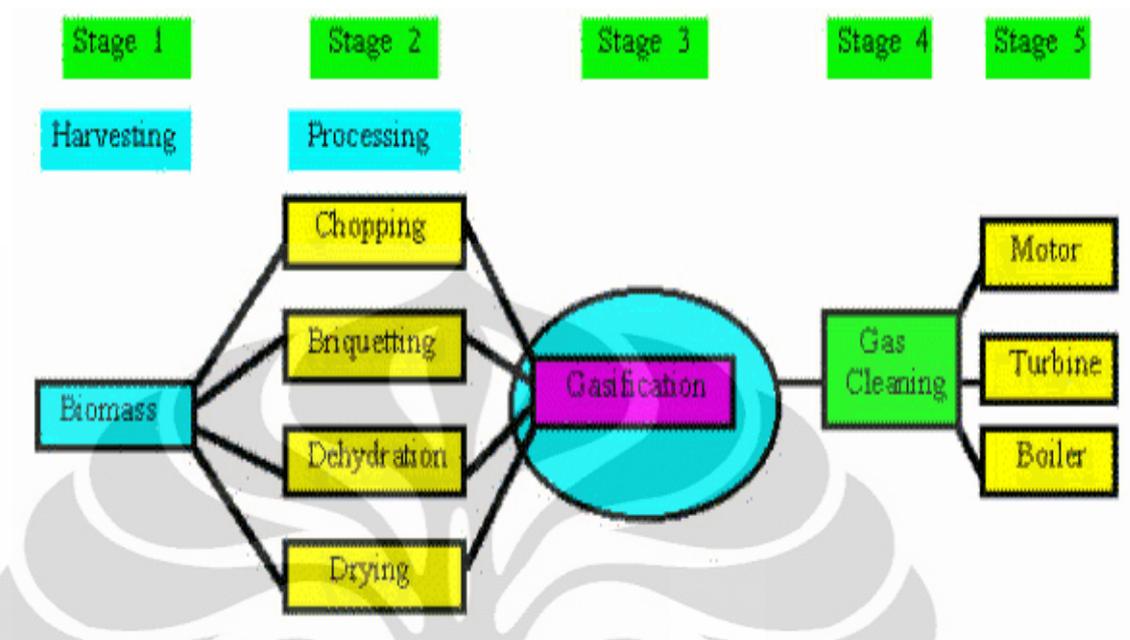


Gambar 2.2 *Direct Combustor*

(Sumber: A Nur Latif, 2011)

#### 2. *Gassification*

Gasifikasi adalah proses pembentukan gas yang dapat terbakar yang berasal dari material organik, seperti kayu, gabah/sampah pertanian yang dipanaskan dan dibakar dengan keadaan oksigen  $1/3$  dari jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran penuh. Pembakaran dengan keadaan kekurangan oksigen inilah yang disebut dengan *pyrolysis*. Proses ini menghasilkan gas yang dapat dibakar seperti  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $N_2$ , dan gas-gas lain yang tak dapat terbakar.



Gambar 2.3 Proses Gasifikasi

(Sumber : <http://www.w3.org>)

Secara umum ada 3 sesi proses gasifikasi biomassa:

Pyrolysis menghasilkan :  $C_6H_{10}O_5 = 5CO + 5H_2 + C$

Oksidasi sebagian menghasilkan :  $C_6H_{10}O_5 + O_2 = 5CO + CO_2 + H_2$

Pembentukan uap menghasilkan :  $C_6H_{10}O_5 + H_2O = 6CO + 6H_2$

Aplikasi pada proses gasifikasi, salah satunya adalah sebagai sumber energi alternatif untuk pembangkit listrik. Dimana bahan bakar gas hasil dari pembakaran (secara gasifikasi) dari sampah organik digunakan untuk memanaskan air hingga berubah fase menjadi uap panas (*steam*) bertekanan tinggi untuk ditransportasikan untuk memutar turbin uap. Shaft dari turbin uap dikoneksikan ke shaft generator dan ketika shaft turbin berotasi mengakibatkan shaft generator berotasi dan kemudian membangkitkan listrik. Setelah uap (*steam*) melewati turbin uap suhunya menjadi lebih rendah dan tekanannya menurun dan dikondensasikan pada *cooling system* oleh kondensor hingga fasenya kembali berubah menjadi air. Dan seterusnya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat gambar skema biomassa power plant berikut.

### 3. *Pyrolysis*

*Pyrolysis* adalah pemanasan dan pembakaran dengan keadaan tanpa oksigen. *Pyrolysis* adalah salah satu bagian dari proses gasifikasi, proses ini akan memecah secara kimiawi biomassa untuk membentuk substansi lain.

Produk dari *Pyrolysis* tergantung dari temperatur, tekanan, dan lain lain. Pada suhu 200<sup>0</sup> C, air akan terpisah dan dibuang, *Pyrolysis* sesungguhnya terjadi pada suhu antara 280 sampai 500<sup>0</sup> C, *Pyrolysis* menghasilkan banyak karbon dioksida, tar, dan sedikit metil alkohol. Antara 500 sampai 700<sup>0</sup> C produksi gas mengandung hidrogen. Secara umum *Pyrolysis* menghasilkan  $C_6H_{10}O_5 = 5CO + 5H_2 + C$ .

### 4. *Liquefaction*

*Liquefaction* adalah proses pembentukan cairan dari suatu gas. Pembentukan gas ini dengan tujuan agar bahan bakar gas mudah untuk ditransportasikan. Banyak macam gas yang hanya membutuhkan pendinginan untuk membuatnya menjadi bentuk cairan. LPG adalah salah satu bentuk dari *liquefaction*

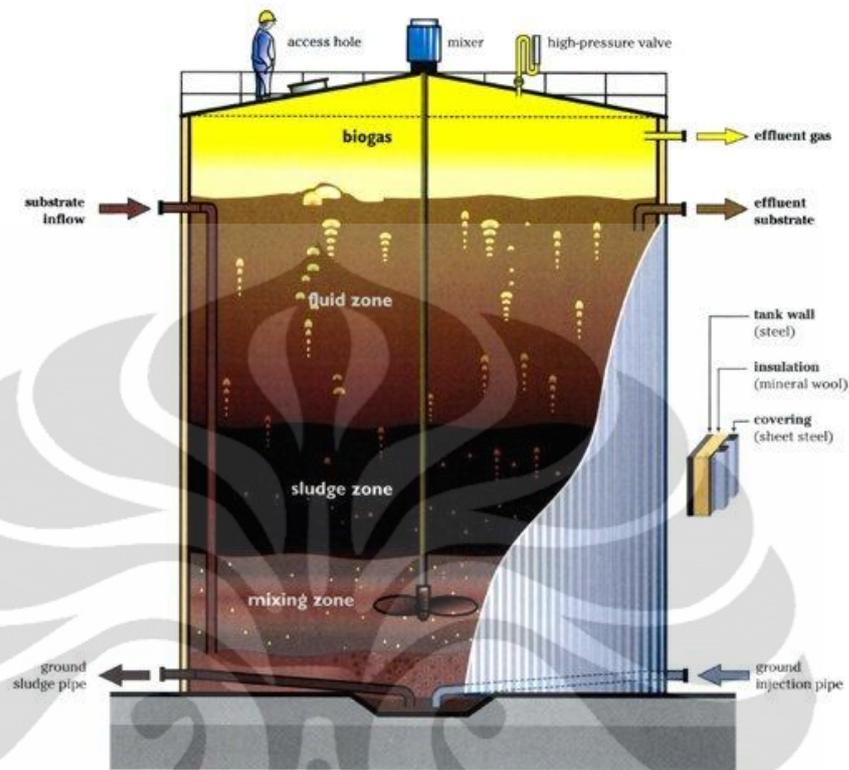
#### 2.1.2.2 Proses Biologis

Proses ini bertujuan untuk menghasilkan gas yang dapat terbakar melalui proses yang mengikutsertakan komponen biologi, yaitu bakteri. Proses ini akan menghasilkan gas dari sampah organik seperti kotoran ternak dan sisa-sisa makanan.

Ada 2 proses yang dapat menghasilkan bahan bakar gas melalui proses biologis, yaitu:

#### 1. *Anaerobic Digestion*

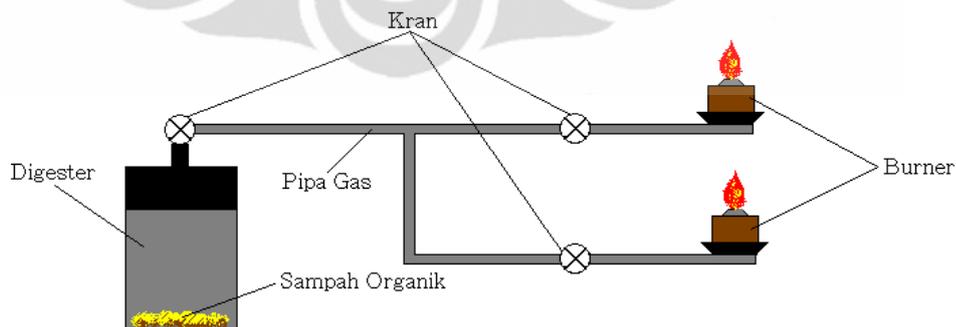
Proses ini adalah proses yang mengikutsertakan mikroorganisme untuk menguraikan material dengan kondisi tanpa oksigen. Proses ini dapat digunakan pada sampah organik dan juga kotoran hewan. *Anaerobic digestion* merupakan proses yang kompleks. Pertama-tama, mikro organisme mengubah material organik kedalam bentuk asam organik. Bakteri anaerob (*methanogenic*) akan mengubah asam ini dan menyelesaikan proses dekomposisi dengan menghasilkan metana.



Gambar 2.4 Anaerobic Digester

(Sumber: [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE\\_anaerobic\\_bacteria.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE_anaerobic_bacteria.html))

Aplikasi dari proses ini, salah satunya adalah untuk menghasilkan uap dari pembakaran gas methana untuk berbagai keperluan. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar rangkaian instalasi berikut.



Gambar 2.5 Rangkaian Instalasi Biogas<sup>[9]</sup>

Gas methana ini merupakan hasil dari reaksi anaerob oleh bakteri pada suatu ruangan tertutup yang disebut dengan digester. Fungsinya untuk

menghindari oksigen dari proses ini. Ada 4 tahapan dalam Anaerob Digestion, yaitu:

### 1. *Hydrolisis*

Merupakan proses untuk memecah komposisi sampah organik menjadi molekul – molekul yang dapat diuraikan oleh bakteri anaerob, yaitu menjadi gula dan asam amino. Proses hydrolisis menggunakan air untuk melepaskan ikatan kimia antar unsur dari sampah organik.

### 2. *Fermentasi*

Zat yang telah dirombak pada proses hydrolisis, oleh bakteri anaerob diuraikan menjadi karbohidrat dan enzim serta asam organik.

### 3. *Acetogenesis*

Produk dari hasil fermentasi diubah menjadi asetat, hidrogen dan karbondioksida oleh bakteri asetogenik.

### 4. *Methanogenesis*

Mengubah produk dari proses acetogenesis menjadi methana dengan bantuan bakteri metanogenik.

## 2. Fermentasi

Fermentasi adalah proses produksi energi dalam sel dalam keadaan anaerobik (tanpa oksigen). Secara umum, fermentasi adalah salah satu bentuk respirasi anaerobik, akan tetapi, terdapat definisi yang lebih jelas yang mendefinisikan fermentasi sebagai respirasi dalam lingkungan anaerobik dengan tanpa akseptor elektron eksternal.

### 2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan

Energi biomassa memiliki kelebihan dan kekurangan beberapa diantaranya yaitu:

Kelebihan energi biomassa :

1. Merupakan energi terbarukan
2. Sumbernya dapat diproduksi secara lokal
3. Menggunakan bahan baku limbah yang murah
4. Untuk penggunaan yang tanpa direct combustor efek lingkungan kecil

Kekurangan energi biomassa :

1. Untuk penggunaan secara *direct combustion* akan menghasilkan gas karbon dioksida dan gas penyebab efek rumah kaca lain yang merupakan penyebab pemanasan global.
2. Membutuhkan energi yang lebih banyak untuk memproduksi biomassa dan mengumpulkannya dari pada energi yang dapat dihasilkan.
3. Masih merupakan sumber energi yang mahal dalam memproduksi, mengumpulkan, dan mengubahnya kedalam bentuk energi yang lain

## 2.2 Karakteristik Biomassa

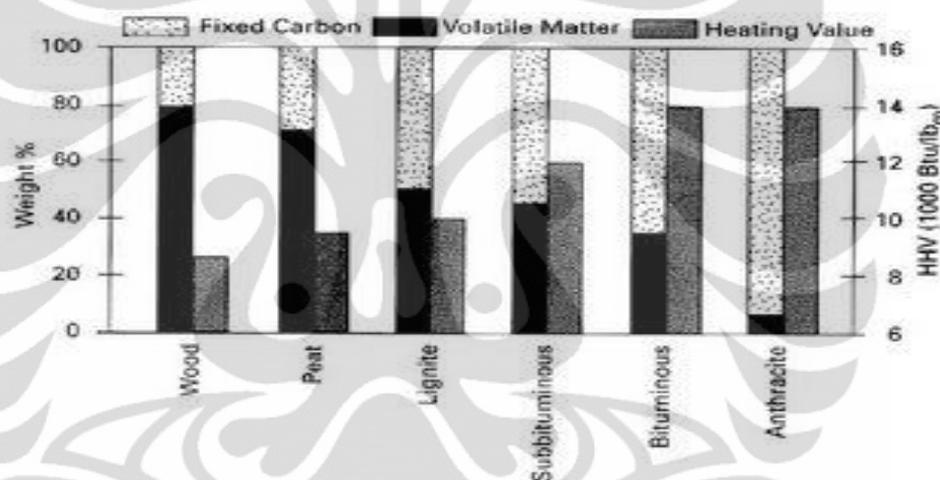
Potensi biomassa yang melimpah merupakan solusi energi masa depan karena dapat dikategorikan sebagai "*green and sustainable energi*" yaitu pemanfaatannya yang bersifat ramah lingkungan dan keberadaannya melimpah di dunia khususnya di Indonesia. Untuk pemanfaatan dengan cara *indirect combustor*, biomassa dikenal sebagai *zero CO<sub>2</sub> emission*, dengan kata lain tidak menyebabkan akumulasi CO<sub>2</sub> di atmosfer, dan biomassa juga mengandung lebih sedikit sulfur jika dibandingkan dengan batubara.

Nilai kalor rendah (LHV) biomassa (15-20 MJ/kg) lebih rendah dibanding nilai kalor batubara (25-33 kJ/kg) dan bahan bakar minyak (*gasoline*, 42,5 MJ/kg). Artinya untuk setiap kg biomassa hanya mampu menghasilkan energi 2/3 dari energi 1 kg batubara dan 1/2 dari energi 1 kg *gasoline*. Nilai kalor berhubungan langsung dengan kadar C dan H yang dikandung oleh bahan bakar padat. Semakin besar kadar keduanya akan semakin besar nilai kalor yang dikandung. Menariknya dengan proses *charing* (pembuatan arang), nilai kalor arang yang dihasilkan akan meningkat cukup tajam. Sebagai gambaran, dari hasil proses pembuatan arang batok kelapa pada temperatur 750°C dapat dihasilkan arang dengan nilai kalor atas (HHV) 31 MJ/kg. Nilai ini setara dengan nilai kalor batubara kelas menengah ke atas.

Nilai kalor rendah (LHV, *lower heating value*) adalah jumlah energi yang dilepaskan dari proses pembakaran suatu bahan bakar dimana kalor laten dari uap air tidak diperhitungkan, atau setelah terbakar, temperatur gas pembakaran dibuat

150°C. Pada temperatur ini, air berada dalam kondisi fasa uap. Jika jumlah kalor laten uap air diperhitungkan atau setelah terbakar, temperatur gas pembakaran dibuat 25°C, maka akan diperoleh nilai kalor atas (HHV, *higher heating value*). Pada temperatur ini, air akan berada dalam kondisi fasa cair.

Biomassa mempunyai kadar *volatile* yang tinggi (sekitar 60-80%) dibanding kadar *volatile* pada batubara, maka biomas lebih reaktif dibanding batubara. Perbandingan bahan bakar (FR) dinyatakan sebagai perbandingan kadar karbon dengan kadar volatil. Untuk batubara, FR ~ 1 - 10. Untuk gambut, FR ~ 0.3. Untuk biomass, FR ~ 0.1. Untuk plastik, FR ~ 0. Analisis proximat untuk beberapa jenis bahan bakar padat dapat dilihat pada gambar di bawah.

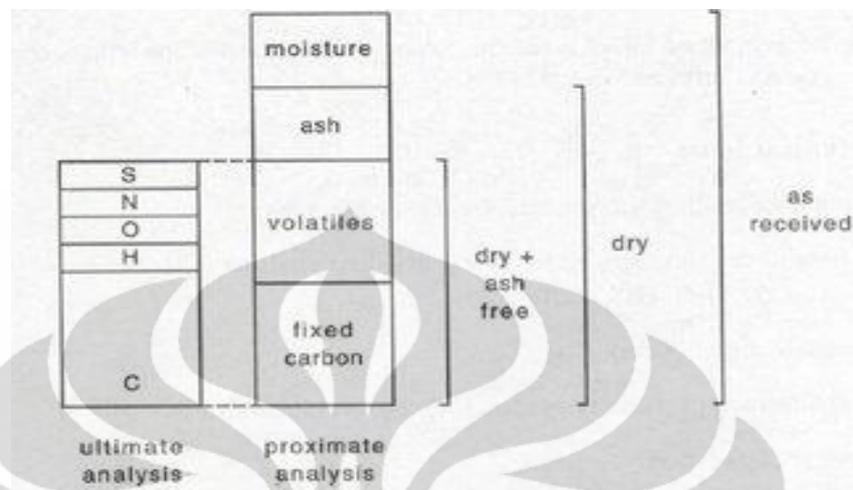


Gambar 2.6 Analisis Proximat untuk Beberapa Jenis Bahan Bakar Padat

(Sumber: <http://kajian-energi.blogspot.com/2007/07/biomass-4.html>)

Pada analisis *proximate* biomassa juga mengandung abu dan air (lihat Gambar di bawah). Massa biomassa awal umumnya diistilahkan sebagai *as received* (mengandung air, abu, volatil, dan karbon). Kadar abu dari biomassa berkisar dari 1% sampai 12% untuk kebanyakan jerami-jeramian dan bagas. Abu dari biomassa lebih ramah dibandingkan abu dari batu bara karena banyak mengandung mineral seperti fosfat dan *potassium*. Pada saat pembakaran maupun gasifikasi, abu dari biomas juga lebih aman dibandingkan abu dari batubara. Dengan temperatur operasi tidak lebih dari 950°C atau 1000°C, abu dari biomassa

tidak menimbulkan terak. Abu biomassa mempunyai jumlah oksida keras (silica dan alumina) yang lebih rendah.



Gambar 2.7 Definisi Analisis Ultimat dan Proximat.

(Sumber: <http://kajian-energi.blogspot.com/2007/07/biomass-4.html>)

Kandungan komposisi beberapa biomassa dapat dilihat dari *proximate* dan *ultimate analysis* yang dapat dilihat pada tabel-tabel di bawah ini.

Tabel 2.1 *Ultimate Analysis* Beberapa Jenis Biomassa

(Sumber: Walter R. Niessen.)

<i>Solid Waste</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>Non Comb.</i>
Daun	52.25	6.11	30.34	6.99	0.16	4.25
Cangkang Kelapa	47.62	6.2	0.7	43.38	-	2.1
Ranting Pohon	50.46	5.97	42.37	0.15	0.05	1
Kertas	43.41	5.82	44.32	0.25	0.20	6.00

Tabel 2.2 *Proximate Analysis* Beberapa Jenis Biomassa

(Sumber: Walter R. Niessen. 1994)

<i>Solid Waste</i>	<i>Moisture</i>	<i>Volatile</i>	<i>Fixed Carbon</i>	<i>Non Comb.</i>
Daun	9.97	66.92	19.29	3.82

Cangkang Kelapa	7,8	80,8	18,8	0,4
Ranting Pohon	20	67.89	11.31	0.8
Kertas	10.24	75.94	8.44	5.38

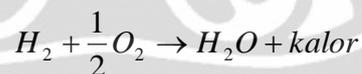
Tabel 2.3 Nilai LHV Beberapa Jenis Biomassa

(Sumber: <http://kajian-energi.blogspot.com/2007/07/biomass-3.html>)

Jenis Bahan Bakar	LHV
Cangkang Kelapa	17000 kJ/kg
Ranting Pohon	15099 kJ/kg

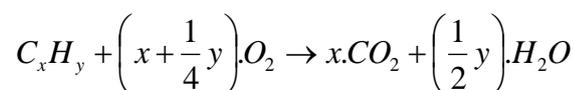
### 2.3 Sistem Reaksi Pembakaran

Pembakaran adalah sebuah reaksi antara oksigen dan bahan bakar yang menghasilkan panas. Oksigen diambil dari udara yang berkomposisi 21 % oksigen serta 79 % nitrogen (persentase volume), atau 77 % oksigen serta 23 % nitrogen (persentase massa). Unsur terbanyak yang terkandung dalam bahan bakar adalah karbon, hidrogen, dan sedikit sulfur. Pembakaran pada umumnya terdiri dari tiga proses, yaitu:



Tiga senyawa dan panas yang dihasilkan tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran.

Pembakaran sempurna adalah pembakaran dengan proporsi yang sesuai antara bahan bakar dengan oksigen. Pada pembakaran yang lebih banyak oksigen dari pada bahan bakar, campuran tersebut dinamakan sebagai campuran kaya. Begitu juga sebaliknya, apabila bahan bakar yang digunakan lebih banyak dari pada oksigen, maka campurannya disebut campuran miskin. Reaksi untuk pembakaran sempurna adalah :



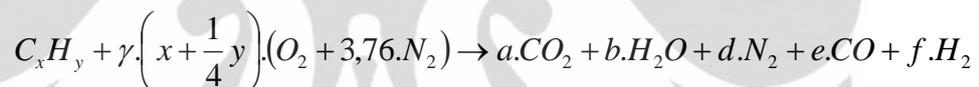
Nilai dari  $x$  dan  $y$  di atas bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai  $x$  adalah fraksi massa untuk kandungan *Carbon*, dan  $y$  fraksi massa untuk kandungan *Hydrogen* dalam bahan bakar.

Namun, kandungan dari udara bebas tidak sepenuhnya mengandung oksigen, karena bercampur dengan nitrogen ( $N_2$ ). Sehingga reaksi stoikiometrinya juga sedikit berbeda dari dasar reaksi pembakaran sempurna.



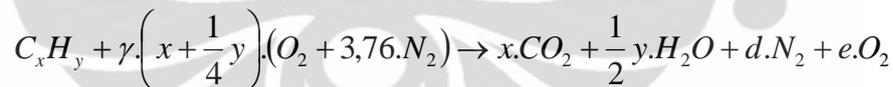
Namun, ada kalanya juga proses pembakaran tidak terjadi pada komposisi ideal antara bahan bakar dengan udara. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses yang tidak pada kondisi ideal ini bisa terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran kaya dan pembakaran miskin.

- Proses pembakaran-kaya



Dari reaksi di atas dapat dilihat bahwa proses pembakaran kaya menghasilkan senyawa lain yaitu karbon monoksida ( $CO$ ) dan hidrogen ( $H_2$ ). Untuk reaksi pembakaran kaya, memiliki satu kriteria, yaitu nilai  $\gamma > 1$ .

- Proses pembakaran-miskin



Gas yang dihasilkan dari pembakaran kaya berbeda dari gas yang dihasilkan dari pembakaran miskin. Pada pembakaran miskin hanya menghasilkan gas oksigen ( $O_2$ ). Untuk pembakaran miskin juga memiliki satu kriteria, yaitu nilai  $\gamma < 1$ .

### 2.3.1 Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Proses Pembakaran

Sebelumnya telah dibahas reaksi kimia pembakaran secara teoritis. Namun pada kenyataannya, proses pembakaran ini akan menghasilkan gas-gas atau sisa-sisa hasil pembakaran lainnya yang tidak disebutkan pada reaksi tersebut. Untuk memperoleh hasil pembakaran yang baik, maka proses pembakaran harus memperhatikan parameter-parameter seperti *mixing* (pencampuran), udara,

temperatur, waktu, dan kerapatan. Berikut ini merupakan hal-hal yang harus diperhatikan dalam proses pembakaran, yaitu :

1. Mixing

Agar pembakaran dapat berlangsung dengan baik, maka diperlukan proses pencampuran antara bahan bakar yang digunakan dengan udara pembakaran. Pencampuran yang baik dapat mengkondisikan proses pembakaran berlangsung dengan sempurna.

2. Udara

Dalam proses pembakaran, udara pembakaran harus diperhatikan, karena dapat menentukan apakah pembakaran tersebut berlangsung dengan sempurna atau tidak sempurna. Pemberian udara yang cukup akan dapat mencegah pembakaran yang tidak sempurna, sehingga  $CO$  dapat bereaksi lagi dengan  $O_2$  untuk membentuk  $CO_2$ .

3. Temperatur

Bila temperatur tidak mencapai atau tidak bisa dipertahankan pada temperatur nyala dari bahan bakar, maka pembakaran tidak akan berlangsung atau berhenti.

4. Waktu

Sebelum terbakar, bahan bakar akan mengeluarkan *volatile meter* agar dapat terbakar. Waktu pada saat bahan bakar melepas *volatile meter* itulah yang dinamakan sebagai waktu pembakaran, atau *time delay*.

5. Kerapatan

Kerapatan yang cukup (untuk pembuatan api) diperlukan guna menjaga kelangsungan pembakaran.

### 2.3.2 Komponen-Komponen Utama Reaksi Pembakaran

Suatu reaksi pembakaran memiliki 3 komponen utama, yaitu :

1. Zat yang dibakar

Unsur-unsur kimia pada bahan bakar yang berpotensi memberikan energi kalor adalah karbon, oksigen, hidrogen, dan sulfur. Setiap bahan bakar memiliki kandungan energi kalor yang dinyatakan dalam jumlah karbon. Jenis bahan bakar dibedakan menjadi tiga bentuk, seperti pada tabel 2.1.

Tabel 2.4 Jenis-Jenis Bahan Bakar

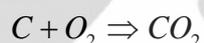
(Sumber: Dari berbagai sumber)

Padat	Cair	Gas
Kayu + Ranting	Solar	LNG
Ampas Tebu	Minyak	LPG
Cangkang + Sabut	Tanah	dll.
Kelapa	Bensin, dll.	
Batu bara, dll.		

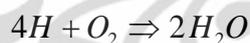
## 2. Zat yang membakar

Jika komposisi bahan bakar diketahui, maka dapat dihitung pula jumlah kebutuhan udara yang proporsional dengan jumlah bahan bakar, agar dapat mencapai pembakaran yang sempurna.

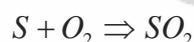
- Karbon terbakar sempurna akan membentuk  $CO_2$  menurut persamaan :



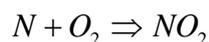
- Hidrogen terbakar sempurna akan membentuk  $H_2O$  menurut persamaan :



- Belerang terbakar akan membentuk  $SO_2$  menurut persamaan :



- Nitrogen terbakar membentuk  $NO_2$  menurut persamaan :



Sedangkan, 1 kg udara mengandung 0,23 kg  $O_2$ , sehingga kebutuhan udara teoritisnya ( $A_o$ ) adalah :

$$A_o = \frac{2,67C + 8H - O + S + 2,29N}{0,23} \text{ kg udara} / \text{kg bahan bakar}$$

Kebutuhan udara dalam proses pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi sebagai berikut :

- Udara primer  
Udara yang bercampur dengan bahan bakar dalam ruang bakar.
- Udara sekunder  
Udara yang masuk dari sekeliling ruang bakar.
- Udara tersier  
Udara yang menembus celah pada ruang bakar.

Kebutuhan udara yang sebenarnya dalam proses pembakaran harus melebihi kebutuhan udara teoritisnya. Hal ini diperlukan untuk mengantisipasi proses pembakaran yang tidak sempurna. Selisih antara jumlah udara aktual dan udara teoritis ini disebut juga sebagai *excess air*. Nilai *excess air* ini selalu merupakan persentase antara selisih jumlah udara aktual dengan udara teoritis, yang berbanding dengan jumlah udara aktual.

Nilai *excess air* ini dapat ditulis sebagai berikut :

$$m = \frac{A - A_o}{A} \cdot 100 \%$$

keterangan :  $m = excess\ air$

$A_o =$  jumlah udara teoritis

$A =$  jumlah udara aktual

### 3. Zat yang dihasilkan dari pembakaran

Berat gas asap yang terbentuk dari hasil pembakaran 1 kg air bahan bakar adalah sama dengan jumlah berat udara yang dibutuhkan, ditambah dengan berat bahan bakar yang berubah menjadi gas asap kecuali abunya.

$$m_{gb} = m_{bb} + A - m_{abu}$$

Gas asap terbentuk dari hasil pembakaran antara gas-gas sisa pembakaran. Pada pembakaran yang sempurna, gas asap terdiri dari komponen-komponen seperti

$CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $N_2$ , dan  $O_2$ . Komponen-komponen tersebut disebut juga sebagai hasil pembakaran (*combustion product*), atau biasa disebut juga sebagai gas buang.

#### **2.4 Fluidized Bed Combustor**

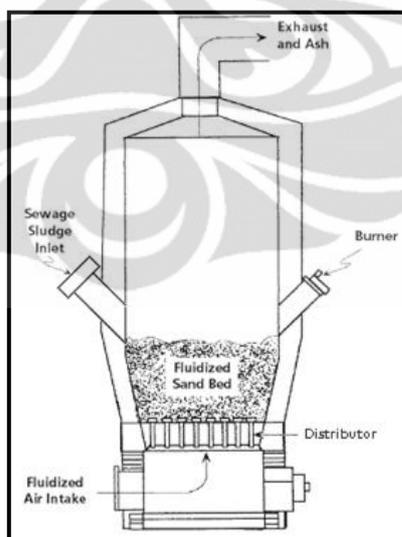
*Fluidized bed combustor* adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa dan silika, tujuannya agar terjadi pencampuran (*mixing*) yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut. *Mixing* yang konstan antara partikel-partikel mendorong terjadinya perpindahan panas yang cepat serta pembakaran sempurna. *Fluidized bed combustor* umumnya berbentuk silindris tegak dengan kerangka baja yang dilapisi bahan tahan api, berisi hampan pasir (*sand bed*) dan distributor untuk fluidisasi udara. *Fluidized bed combustor* normalnya tersedia dalam ukuran berdiameter dari 9 sampai 34 ft.

Hampan pasir yang menjadi media pengaduk diletakkan di atas *distributor* yang berupa grid logam dengan dilapisi bahan tahan api. Grid ini berisi suatu pelat berpori berisi nosel-nosel injeksi udara atau *tuyere* di mana udara dialirkan ke dalam ruang bakar untuk menfluidisasi hampan (*bed*) tersebut. Aliran udara melalui nosel hampan terfluidisasi sehingga berkembang menjadi dua kali volume sebelumnya. Fluidisasi meningkatkan pencampuran dan turbulensi serta laju perpindahan panas yang terjadi. Bahan bakar bantu digunakan selama pemanasan awal untuk memanaskan hampan sampai temperatur operasi sekitar 600 sampai 900 °C sehingga pembakaran dapat terjaga pada temperatur konstan. Dalam beberapa instalasi, suatu sistem *water spray* digunakan untuk mengendalikan suhu ruang bakar.

Reaktor unggun atau hampan fluidisasi (*fluidized bed*) berfungsi meningkatkan penyebaran umpan bahan bakar yang datang dengan pemanasan yang cepat sampai temperatur pengapiannya (*ignition*) serta meningkatkan waktu kontak yang cukup dan juga kondisi pencampuran yang hebat untuk pembakaran sempurna. Pembakaran normalnya terjadi sendiri, sehingga bahan bakar hancur dengan cepat, kering dan terbakar di dalam hampan. Laju pembakaran akan meningkat seiring dengan meningkatnya laju pirolisis dari bahan bakar padat

karena kontak langsung dengan partikel hamparan yang panas. Aliran udara fluidisasi meniup abu halus dari hamparan. Gas-gas pembakaran biasanya diproses lagi di *wet scrubber* dan abunya dibuang secara *landfill*.

Pembakaran dengan teknologi *fluidized bed* merupakan satu rancangan alternatif untuk pembakaran limbah padat. Teknologi ini telah diaplikasikan untuk berbagai macam bahan bakar padat seperti biofuel, batu bara, serta limbah, baik itu limbah organik maupun anorganik. Bahan bakar padat yang sudah dalam bentuk tercacah atau dipotong-potong menjadi kecil-kecil, dimasukkan ke dalam ruang bakar dengan kapasitas yang konstan dan diletakkan tepat di atas pasir-pasir tersebut. Udara untuk proses pembakaran diberikan dari blower yang melewati *plenum* yaitu bagian *fluidized bed combustor* yang letaknya terdapat di bawah ruang bakar dan berfungsi sebagai saluran udara. Kemudian udara tersebut akan melewati *distributor* sehingga aliran udara yang akan masuk ke dalam ruang bakar akan bergerak secara seragam menuju timbunan pasir yang ada di atasnya [Basu : 1994; Howard : 1994]. Kemudian ruang kosong yang ada di ruang bakar, dan tepat di atas timbunan pasir, disebut juga sebagai *freeboard* atau juga *riser*. Pada bagian inilah terjadi perubahan partikel padat menjadi gas. Gas-gas yang dihasilkan akan terbang ke udara setelah melewati alat kontrol polusi udara.

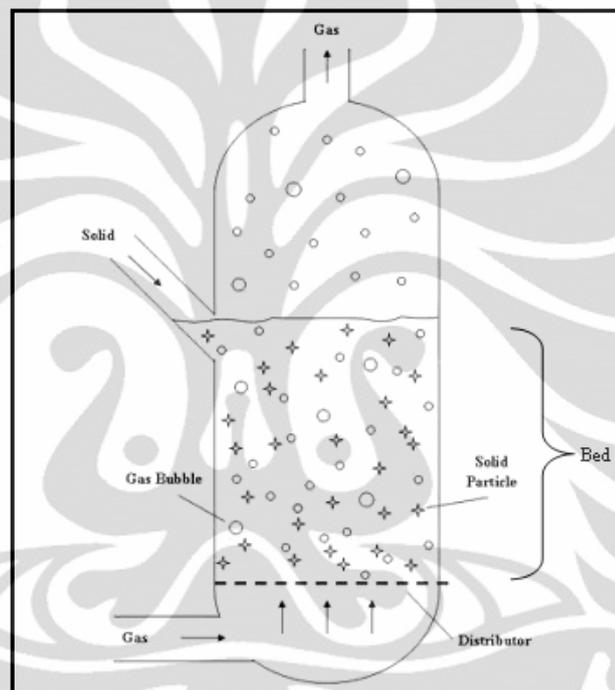


Gambar 2.8 Skematis *Fluidized Bed Combustor*

(Sumber: R. Arya Sutrisno. 2010)

Suatu pandangan potongan *fluidized bed combustor* dipertunjukkan seperti gambar 2.3. Terlihat pada gambar tersebut bahwa *fluidized bed combustor*

memiliki satu ruangan dimana pengeringan dan pembakaran terjadi di hamparan pasir terfluidisasi. Waktu kontak di dalam daerah pembakaran hanyalah beberapa detik pada temperatur 750 sampai 900 °C. Abu terbawa keluar dari puncak ruang bakar dan dibersihkan dengan alat kontrol polusi udara. Pasir yang terbawa dengan abu harus diganti. Pasir yang terbangun pada umumnya 5 persen dari volume hamparan untuk setiap 300 jam operasi. Pengumpanan (*feed*) pada ruang bakar itu dimasukkan baik dari atas atau secara langsung ke dalam hamparan.



Gambar 2.9 Diagram Proses Pencampuran (*mixing*) dalam *Fluidized Bed Combustor*

(Sumber: <http://www.anagrammer.com/scrabble/fluidize>)

Pencampuran dalam *fluidized bed* terdistribusi secara cepat dan seragam antara bahan bakar dan udara atau gas seperti yang diperlihatkan pada gambar, sehingga mengakibatkan perpindahan kalor dan pembakaran yang baik. Hamparan pasir itu sendiri memiliki kapasitas panas yang besar, yang membantu mengurangi terjadinya fluktuasi temperatur sesaat yang dapat diakibatkan oleh nilai kalor bahan bakar (sampah) yang bervariasi. Kapasitas penyimpanan panas ini juga memungkinkan untuk proses *startup* yang lebih cepat, jika waktu *shutdown* sebelumnya belum terlalu lama. Proses pembakaran dengan teknologi ini telah berkembang relatif cepat sejak tahun 1960-an, dan sampai saat ini metode ini

masih terus dikembangkan lebih lanjut di kawasan Eropa, Amerika, Jepang, Australia, dan negara-negara maju lainnya.

#### 2.4.1 Jenis-Jenis Fluidized Bed Combustor

*Fluidized bed combustor* dapat beroperasi dalam dua jenis sistem, yaitu *bubbling* dan *circulating*, tergantung pada kecepatan udara yang masuk ke dalam ruang bakar. *Fluidized bed combustor* dengan sistem *bubbling* biasa disebut dengan insinerator *Bubling Fluidized Bed* (BFB) sedangkan jenis lainnya adalah insinerator *Circulating Fluidized Bed* (CFB), yang mana kecepatan udara yang lebih tinggi menyebabkan laju perpindahan partikel yang tinggi.

*Bubling Fluidized Bed* beroperasi ketika kecepatan aliran udara tidak cukup tinggi untuk membawa partikel hamparan yaitu pasir untuk keluar dari *riser* menuju siklon. Sistem *bubbling* pada *fluidized bed combustor* terjadi pada kecepatan udara yang relatif rendah antara 0,1 – 3 m/s, bergantung pada ukuran dari partikel pasir yang digunakan. Pada kondisi ini, hamparan harus dibersihkan dari partikel abu secara manual. Sedangkan pada CFB memiliki kecepatan gas atau udara yang lebih tinggi, biasanya 4-6 m/s. Ketinggian *freeboard* untuk *combustor zone* pun lebih tinggi dibandingkan dengan BFB. Material yang berpindah terbawa keluar sistem diperoleh kembali dengan mensirkulasikan partikel tersebut ke dalam sistem.

Selanjutnya udara pembakaran pada CFB disuplai dalam dua tahap yaitu udara primer (fluidisasi) dan udara sekunder, dan sehingga beban daya dari blower dapat dikurangi. Pembakaran dua tahap ini juga dilakukan untuk mengurangi efek buruk terhadap lingkungan seperti polutan yang dihasilkan. BFB memiliki kekurangan pada proses *agitation* (pergolakan) dan pencampuran dalam ruang bakar terganggu jika ukuran ruang bakar diperbesar. Sebaliknya, CFB berukuran besar pun dapat menjaga pembakaran dengan baik sekali karena terjadinya proses *agitation* yang cukup dan pencampuran dipengaruhi oleh fluidisasi berkecepatan tinggi. Dalam pembakaran CFB, bagian dari material *bed* dan *unburned char* yang terbawa keluar dari atas *riser* ditangkap oleh siklon dan disirkulasikan kembali ke dalam sistem, dan terbakar dengan sempurna.

### 2.4.2 Pinsip Kerja *Fluidized Bed Combustor*

Teknologi pembakaran dengan menggunakan metode *fluidized bed* telah memperkenalkan beberapa konsep penting dalam pembakaran sampah atau bahan padat [Tillman, 1991], yaitu :

- Turbulensi partikel padatan, dengan meningkatkan kontak fisik antara partikel padat (pasir) dengan bahan bakar (sampah), yang menghasilkan panas dan perpindahan panas yang lebih baik, dan juga menunjukkan panas yang seragam di sekitar pasir, dan juga di sekitar ruang bakar secara umumnya.
- Temperatur sebagai kontrol variabel yang independen dapat meningkatkan kontrol polusi yang dapat dihasilkan oleh penempatan bahan bakar dan sistem distribusi udara, serta penempatan tabung *heat recovery* dalam reaktor.
- Penggunaan pasir sebagai *inert material* dapat mengurangi dampak sisa hasil pembakaran dengan menggunakan bahan bakar yang basah atau kotor.

Proses kerja *fluidized bed combustor* terutama terdiri dari tiga tahapan. Dari kondisi awal, pemanasan dan kondisi operasi.

#### 1. Kondisi awal

Pada kondisi awal, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.5a, ruang bakar masih pada temperatur ruang. Pasir sebagai media pengaduk sekaligus pertukaran kalor dituang ke dalam ruang bakar.

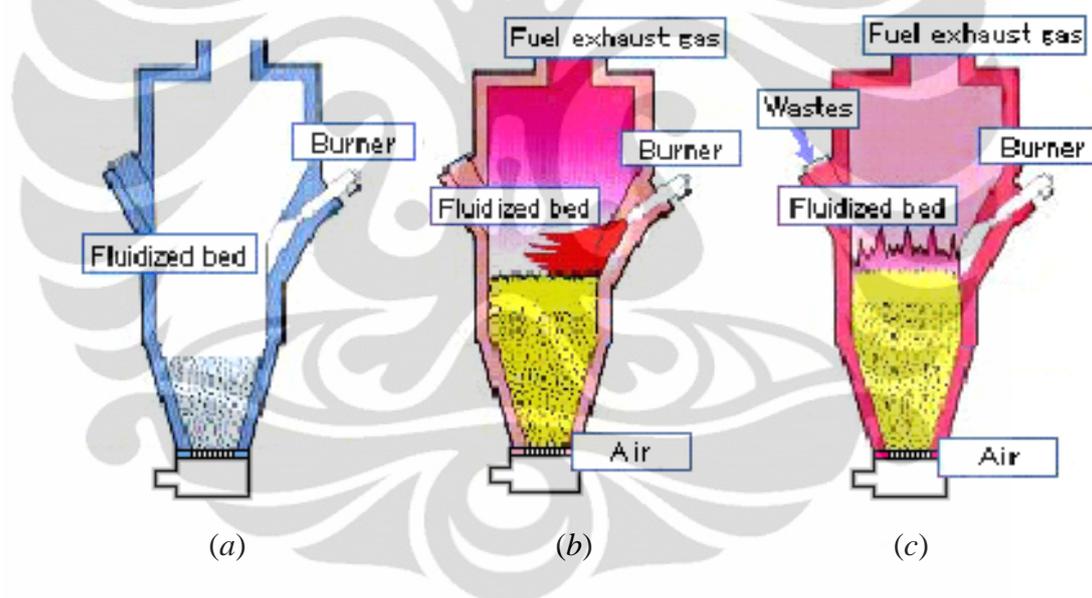
#### 2. Proses pemanasan

Pada tahapan proses pemanasan, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.5b, pasir tersebut mulai dipanaskan. Udara bertekanan mulai dialirkan dari blower ke dalam ruang bakar dari bagian bawah insinerator untuk menfluidisasi pasir. Pada kondisi ini sudah terjadi fluidisasi pada kecepatan fluidisasi minimum. Proses pemanasan dilakukan dengan bahan bakar bantu dari burner. Burner memanaskan pasir sampai temperatur operasi (750 – 900 °C). Untuk mempercepat pemanasan dapat ditambahkan bahan bakar ke dalam reaktor berupa kayu bakar atau pun batu bara.

### 3. Kondisi operasi

Pada kondisi operasi, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.5c, temperatur ruang bakar pada hamparan sudah mencapai temperatur operasi. Pada kondisi ini bahan bakar bantu tidak dipakai lagi, burner dimatikan. Temperatur ruang bakar terjaga konstan dengan laju pengumpanan sampah yang tetap. Kecepatan udara dari blower dinaikkan sampai pada kecepatan pengoperasian maksimum. Sampah akan terbakar sendiri pada kondisi ini karena panas yang diberikan oleh pasir sudah melewati temperatur nyala dari sampah.

Secara umum tahapan-tahapan proses kerja dari *fluidized bed combustor* dapat dilihat pada ilustrasi gambar-gambar di bawah ini.



Gambar 2.10 Tahapan Proses Kerja *Fluidized Bed Combustor*; (a) Tahapan pada Kondisi Awal; (b) Tahapan Proses Pemanasan; (c) Tahapan pada Kondisi Operasi.

(Sumber: R. Arya Sutrisno. 2010 )

#### 2.4.3 Bagian-Bagian Fluidized Bed Combustor

*Fluidized bed combustor* memiliki banyak bagian-bagian penting yang harus diperhatikan dalam pengoperasiannya. Bagian-bagian penting tersebut di

antaranya terdiri dari *fluidization vessel*, *solid feeder*, *burner*, *bed material*, *cyclone separator*, *blower*, dan *instrumentation*.

#### 2.4.3.1 *Fluidization Vessel*

*Fluidization vessel* sebagian besar terbuat dari rangka baja yang dilapisi material tahan panas. Biasanya berbentuk silinder tegak dengan diameter 9 – 34ft. Secara umum *fluidization vessel* terdiri dari 3 bagian utama yaitu :

##### 1. Ruang Bakar

Ruang bakar ini merupakan ruang tempat meletakkan pasir dan umpan sampah yang akan dibakar, sehingga proses pembakaran terjadi di sini. Pasir difluidisasi di ruang bakar ini dengan suplai udara dari blower. Ruang bakar dalam *fluidized bed combustor* juga harus dapat menjaga temperatur pasir yang dapat mencapai 800 – 900 °C.



Gambar 2.11 Ruang Bakar Utama *Fluidized Bed Combustor* UI

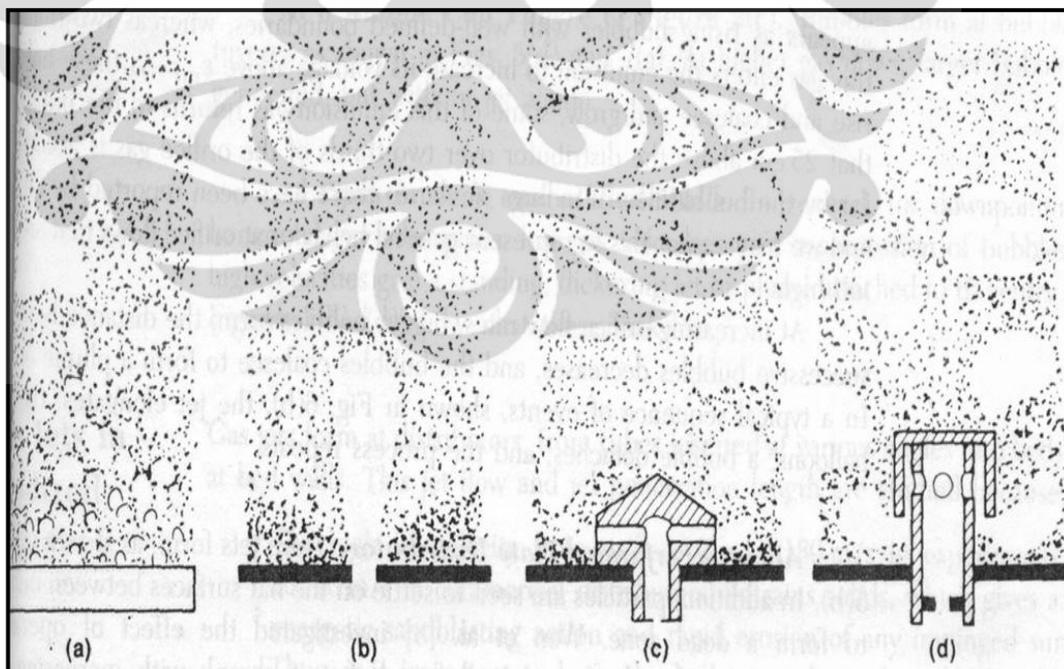
(Sumber: Laboratorium FBC UI)

Ketika sistem bekerja dalam fluidisasi dengan kecepatan tinggi, bahan bakar akan terbakar setelah fase *bubbling*. Di dalam ruang bakar akan terjadi urutan-urutan reaksi, yaitu: pengeringan (*drying*), pemanasan (*heating*), pirolisa

partikel solid, dan oksidasi. Ruang bakar utama ini merupakan area yang paling penting dalam proses pembakaran, selain sebagai tempat terjadinya proses pembakaran, area ini juga berfungsi sebagai tempat penyimpanan. Volume yang besar dari ruang bakar ini membantu dalam proses pirolisa terhadap bahan bakar padat, dan juga dapat membantu peningkatan stabilitas termal di dalam ruang bakar.

## 2. Distributor

Distributor digunakan untuk mendistribusikan aliran udara dari blower secara seragam pada keseluruhan penampang reaktor sehingga hamparan pasir yang ditopang oleh distributor tersebut terjadi fluidisasi. Distributor ini juga memiliki pengaruh terhadap ukuran dan jumlah *bubble* yang dihasilkan. Terdapat beberapa jenis distributor yang sering digunakan, yaitu *porous plate*, *perforated plate*, *nozzle-type tuyere*, dan *bubble cap tuyere*. Masing-masing jenis distributor tersebut dapat menghasilkan perilaku gelembung yang berbeda-beda seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.12:



Gambar 2.12 Perilaku Gelembung Setiap Jenis Distributor; (a) *Porous Plate*; (b) *Perforated Plate*; (c) *Nozzle-type Tuyere*; (d) *Bubble Cap Tuyere*.

(Sumber: R. Arya Sutrisno. 2010)



Gambar 2.13 Distributor yang Digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

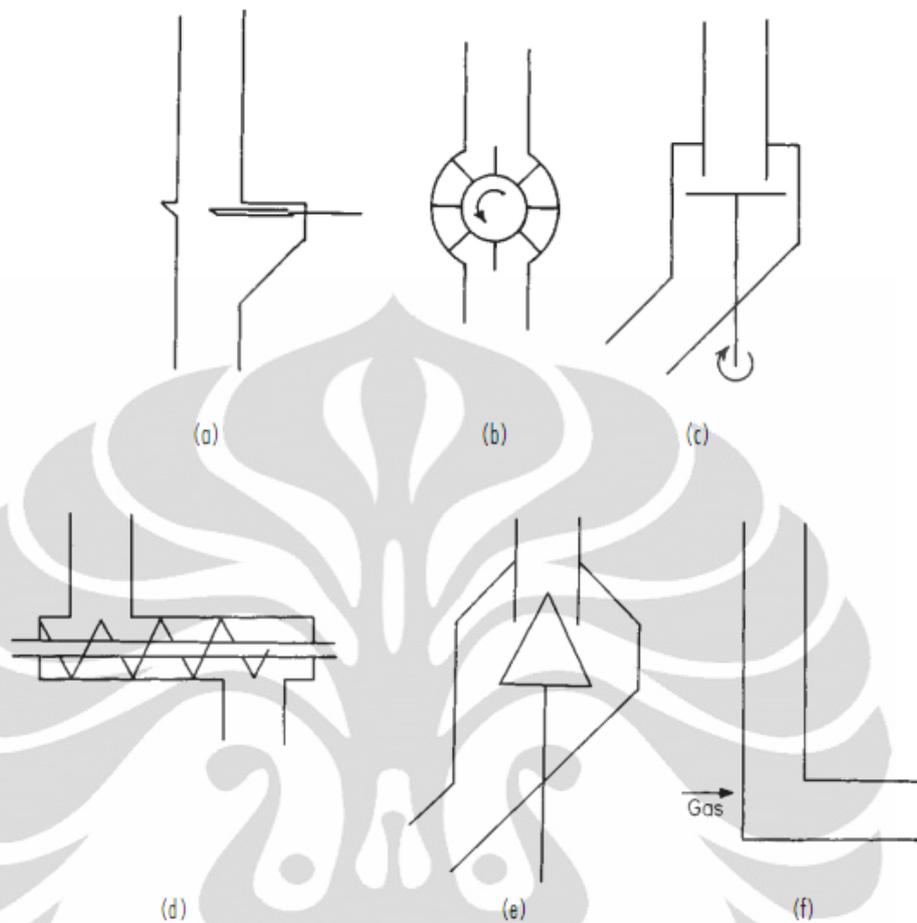
(Sumber: Laboratorium FBC UI)

### 3. *Plenum*

*Plenum* merupakan bagian fluidized vessel yang berfungsi sebagai saluran udara menuju distributor. *Plenum* umumnya berbentuk kerucut dan terletak di bawah distributor. Udara yang dialirkan oleh gas supply (pada FBC UI menggunakan blower) akan diteruskan melewati pipa saluran udara. Kemudian udara tersebut akan melewati plenum. Di *plenum* ini akan terjadi perubahan kecepatan aliran udara. Hal ini disebabkan adanya perbesaran ukuran penampang saluran pada *plenum*.

#### 2.4.3.2 *Solid Feeder*

*Solid feeder* merupakan bagian dari *fluidized bed combustor* yang berfungsi mengalirkan sejumlah bahan bakar menuju ruang bakar. Ada beberapa jenis dari *solid flow control* yang sering digunakan yaitu jenis *slide valve*, *rotary valve*, *table feeder*, *screw feeder*, *cone valve*, dan *L valve*.



Gambar 2.14 Jenis-Jenis *Solid Flow Control*; (a) *Slide Valve* (b) *Rotary Valve*; (c) *Table Feeder*; (d) *Screw Feeder*; (e) *Cone Valve*; (f) *L Valve*  
(Sumber: R. Arya Sutrisno. 2010)

Jenis-jenis tersebut mempunyai kemampuan mengontrol laju aliran yang berbeda-beda. Ukuran partikel yang akan dipindahkan sangat menentukan tipe *feeder* apa yang akan digunakan. Selain itu masih banyak parameter yang perlu diperhitungkan dalam mendesign sebuah *feeder*, seperti kapasitas material yang ingin dipindahkan, massa jenis material, tingkat abrasifitas material, kecepatan aliran, dan lain-lain.

*Fluidized bed combustor* di UI menggunakan tipe *screw feeder* untuk mengalirkan bahan bakar ke dalam ruang bakar. *Screw feeder* tersebut digerakkan oleh rantai yang dihubungkan ke sebuah motor listrik.



Gambar 2.15 *Screw Feeder*

(Sumber: Laboratorium FBC UI)

#### 2.4.3.3 *Burner*

*Burner* merupakan komponen penting pada *fluidized bed combustor*. *Burner* digunakan sebagai alat untuk proses pemanasan awal. *Burner* berfungsi untuk memanaskan pasir sampai pasir tersebut mencapai temperatur 750-800 °C. Dalam pengoperasiannya, *burner* hanyalah digunakan sementara. *Burner* tidak digunakan selamanya selama pengoperasian alat berlangsung seperti halnya blower, namun *burner* hanya digunakan pada proses awal saat proses pemanasan pasir dilakukan sampai temperatur operasi. Ketika hamparan pasir sudah mencapai temperatur yang diinginkan, maka *burner* ini akan berhenti bekerja.

*Burner* yang digunakan pada alat *fluidized bed combustor* UI merupakan *burner* gas dengan bahan bakar gas LPG. *Burner* yang digunakan tersebut diharapkan dapat memanaskan pasir secepat mungkin. Hal ini berhubungan dengan nilai efisiensi dan efektifitas pengoperasian alat *fluidized bed combustor* UI secara keseluruhan. Parameter yang digunakan dalam penggunaan *burner* adalah besar kapasitas kalor yang dapat dihasilkan *burner* setiap satu waktu. Semakin besar nilai kapasitas kalor yang dimiliki *burner* maka semakin baik dan efektiflah *burner* tersebut. Namun ada beberapa faktor lain yang dipertimbangkan dalam penggunaan *burner* seperti keamanan dalam penggunaan (*safety*), dan ketahanan *burner* (*endurance*).



Gambar 2.16 *Burner* yang digunakan pada *Fluidized Bed Combustor* UI

(Sumber: Laboratorium FBC UI)

#### 2.4.3.4 *Bed Material*

Material hamparan (*Bed Material*) yang digunakan pada *fluidized bed combustor* adalah pasir. Pasir ini digunakan sebagai media pentransfer panas terhadap bahan bakar yang akan dibakar. Salah satu persyaratan yang harus dimiliki oleh pasir adalah nilai konduktifitas termal yang baik dan kalor jenis yang rendah. Fungsi partikel dalam *fluidized bed combustor* ialah untuk membantu pembakaran di dalam ruang bakar dan membantu mempertahankan temperatur ruang bakar. Partikel-partikel tersebut harus mampu menjadi penahan *thermal shock* (lonjakan suhu). Partikel yang umumnya digunakan adalah pasir silika atau kuarsa, dengan ukuran partikel 20 *mesh* sampai 50 *mesh*. Pasir yang digunakan sebagai media harus memenuhi persyaratan teknik diantaranya yaitu konduktifitas termal yang tinggi, kalor jenis yang rendah, titik lebur yang tinggi, serta tahan terhadap temperature tinggi dalam waktu yang lama.

Partikel pasir yang digunakan, diklasifikasikan dalam beberapa kelompok [Geldart. 1991]. Kelompok-kelompok pasir tersebut yaitu:

- *Group A*

Material pasir dikategorikan ke dalam kelompok ini memiliki diameter partikel ( $d_p$ ) berkisar antara 20  $\mu m$  sampai 100  $\mu m$  dan densitas partikel kurang

dari  $1400 \text{ kg/m}^3$ . Material ini paling mudah terfluidisasi dibandingkan kelompok yang lain.

- *Group B*

Material kelompok ini cenderung memiliki ukuran rata-rata diameter partikel berkisar antara  $40 \mu\text{m}$  sampai  $500 \mu\text{m}$  dan densitasnya berkisar antara 1400 sampai  $4000 \text{ kg/m}^3$ .

- *Group C*

Kelompok ini memiliki ukuran rata-rata diameter partikel yang lebih kecil ( $<30 \mu\text{m}$ ) dengan densitas yang kecil. Partikelnya sangat halus seperti tepung. Fluidisasi sangat sulit terjadi karena gaya interstitial antara partikel mempunyai efek yang lebih besar dibandingkan gaya gravitasi.

- *Group D*

Material kelompok ini biasanya memiliki ukuran rata-rata diameter partikel lebih besar dari  $600 \mu\text{m}$  dan paling besar di antara kelompok lainnya. Kelompok ini membutuhkan kecepatan fluidisasi yang besar sehingga sangat sulit untuk pencampuran yang baik dibandingkan kelompok A dan B.

Untuk tujuan fluidisasi yang baik, sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa dengan ukuran diameter  $400 - 600 \mu\text{m}$ . Pasir jenis ini diklasifikasikan diantara grup B. Pasir kuarsa dan pasir silika tidak jauh berbeda kandungannya, keduanya sama-sama memiliki kandungan  $\text{SiO}_2$ . Kedua pasir tersebut berasal dari batuan yang sangat keras sehingga sangat cocok digunakan untuk penggunaan pada temperatur tinggi dan sebagai media pemindah panas.

#### 2.4.3.5 Cyclone separator

*Cyclone separator* merupakan salah satu komponen penting sebagai *gas cleaning system* dari hasil proses pembakaran yang terjadi. *Cyclone separator* berfungsi sebagai alat pemisah partikel padat dengan gas. Pada komponen ini, yang dipisahkan adalah partikel-partikel hasil dari proses pembakaran. Akibat yang dihasilkan dari proses pembakaran yang terjadi, terutama pembakaran dengan *fluidized bed combustor*, akan menghasilkan partikel-partikel padat besar dan partikel-partikel padat kecil beserta dengan partikel gas.

Partikel yang memiliki nilai kerapatan lebih besar, dalam hal ini adalah partikel padat, akan jatuh turun ke bawah dan kemudian ditampung. Biasanya, partikel tersebut adalah abu-abu hasil sisa pembakaran. Begitu juga sebaliknya, partikel-partikel yang memiliki kerapatan lebih kecil, akan terbang terangkat ke atas. Biasanya, partikel-partikel tersebut adalah gas-gas hasil pembakaran, seperti  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$  dan lain-lain. *Cyclone separator* ini sendiri belum memadai sebagai *gas cleaning system*, seharusnya terdapat komponen lainnya seperti *scrubber*.



Gambar 2.17 *Cyclone Separator Fluidized Bed Combustor* UI

(Sumber: Laboratorium FBC UI)

#### 2.4.3.6 Blower

Blower merupakan salah satu komponen vital yang digunakan untuk aplikasi teknologi *fluidized bed*. Blower tersebut berfungsi untuk mengalirkan udara ke reaktor dengan debit tertentu sehingga pasir silika yang ditopang dengan plat distributor tersebut terfluidisasi. Blower harus dapat memberikan aliran udara dengan kecepatan aliran yang mencukupi sehingga terjadi fluidisasi, dan sebagai tolok ukurnya dapat dilihat dari kecepatan fluidisasi minimum. Selain harus dapat mengalirkan udara dengan kecepatan udara setidaknya sebesar kecepatan fluidisasi minimumnya, blower harus juga dapat memberikan cukup tekanan yang lebih besar dari pada nilai *pressure drop* (penurunan tekanan) yang melewati hamparan pasir. Pada saat proses pemilihan blower yang akan digunakan pada

*fluidized bed combustor* UI, parameter-parameter yang digunakan dalam pemilihan tersebut adalah besar debit aliran maksimum blower, besar tekanan maksimum blower, dan besar daya yang dibutuhkan blower.



Gambar 2.18 Blower Sentrifugal yang Digunakan pada FBC

(Sumber: Laboratorium FBC UI)

#### 2.4.3.7 Instrumentation

Instrumentasi merupakan peralatan pendukung yang digunakan pada saat pengoperasian *fluidized bed combustor*. Peralatan tersebut juga sangat penting saat pengoperasian berlangsung. Adapun beberapa instrument yang digunakan pada *fluidized bed combustor* UI yaitu sebagai berikut :

##### 1. Control Panel

Berfungsi untuk mengontrol putaran feeder dan putaran blower.



Gambar 2.19 Control Panel

(Sumber: Laboratorium FBC UI)

## 2. Termokopel

Berfungsi untuk mengukur temperatur di dalam ruang bakar.

## 3. Data logger

Berfungsi membaca temperatur yang disensing oleh termokopel dan menampilkannya secara digital.



Gambar 2.20 Data Logger

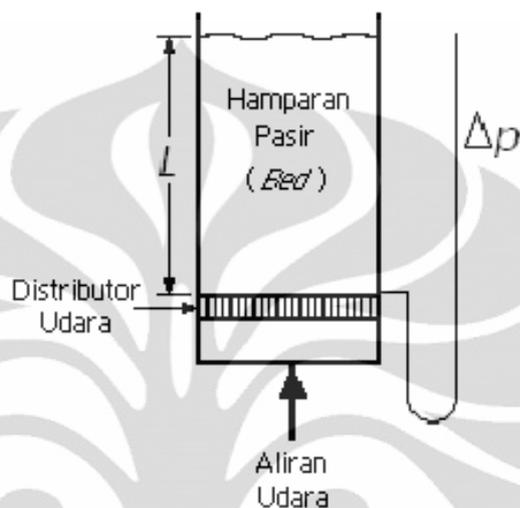
(Sumber: Laboratorium FBC UI)

## 2.5 Fenomena Fluidisasi

### 2.5.1 Proses Fluidisasi

Bila suatu zat cair atau gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel padat pada kecepatan rendah, partikel-partikel itu tidak bergerak. Jika kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikkan, partikel-partikel itu akhirnya akan mulai bergerak dan melayang di dalam fluida. Istilah “fluidisasi” (*fluidization*) dan “hamparan fluidisasi” (*fluidized bed*) biasa digunakan untuk memeriksa keadaan partikel yang seluruhnya dalam keadaan melayang (suspensi), karena suspensi ini berperilaku seakan-akan fluida rapat. Jika hamparan itu dimiringkan, permukaan atasnya akan tetap horisontal, dan benda-benda besar akan mengapung atau tenggelam di dalam hamparan itu bergantung pada perbandingan densitasnya

terhadap suspensi. Zat padat yang terfluidisasi dapat dikosongkan dari hamparannya melalui pipa dan katup sebagaimana halnya suatu zat cair, dan sifat fluiditas ini merupakan keuntungan utama dari penggunaan fluidisasi untuk menangani zat padat.



Gambar 2.21 Skematik Fluidisasi

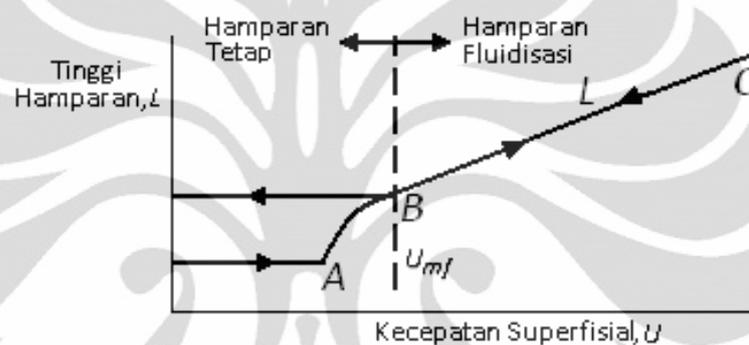
(Sumber: R. Arya Sutrisno. 2010)

### 2.5.2 Kondisi Fluidisasi

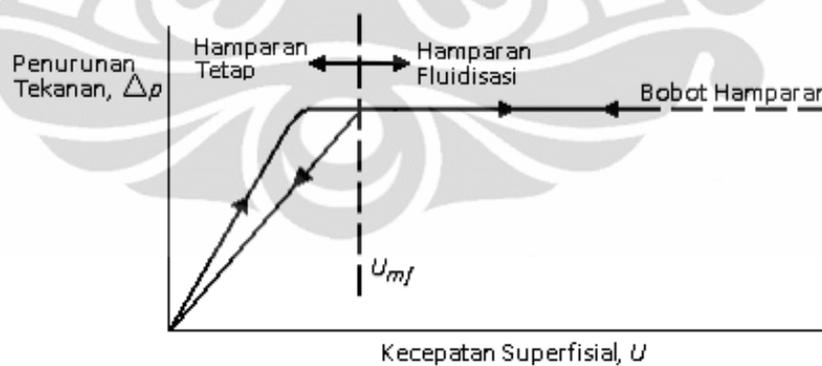
Perhatikan suatu tabung vertikal yang sebagian berisi dengan bahan butiran, sebagaimana terlihat dalam skema gambar. Tabung itu turbulen pada bagian atas, dan mempunyai plat berpori pada bagian bawah untuk menopang pasir di atasnya serta untuk menyebarkan aliran secara seragam pada keseluruhan penampang. Udara dimasukkan di bawah plat distribusi atau distributor (penyebar udara) dengan laju lambat, dan naik ke atas melalui hamparan tanpa menyebabkan terjadinya gerakan pada partikel. Jika partikel itu cukup kecil, aliran di dalam saluran-saluran di antara partikel-partikel dalam hamparan itu akan bersifat laminar. Jika kecepatan itu berangsur-angsur dinaikkan, penurunan tekanan (*pressure drop*) akan meningkat, tetapi partikel-partikel itu masih tetap tidak bergerak dan tinggi hamparan pun tidak berubah.

Pada kecepatan tertentu, penurunan tekanan melintas hamparan itu akan mengimbangi gaya gravitasi yang dialaminya; dengan kata lain, mengimbangi

bobot hamparan, dan jika kecepatan masih dinaikkan lagi, partikel itu akan mulai bergerak. Titik ini digambarkan oleh titik *A* pada grafik gambar 2.10. Jika kecepatan itu terus ditingkatkan lagi, partikel-partikel itu akan memisah dan menjadi cukup berjauhan satu sama lain sehingga dapat berpindah-pindah di dalam hamparan itu, dan fluidisasi yang sebenarnya pun mulailah terjadi (titik *B*). Jika hamparan itu sudah terfluidisasi, penurunan tekanan melintasi hamparan tetap konstan (gambar 3.2 dan 3.3), akan tetapi tinggi hamparan bertambah terus jika aliran ditingkatkan lagi.



Gambar 2.22 Hubungan Tinggi Hamparan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hamparan Zat Padat



Gambar 2.23 Hubungan Penurunan Tekanan Terhadap Kecepatan Superfisial di Dalam Hamparan Zat Padat

(Sumber: R. Arya Sutrisno. 2010)

Jika laju aliran ke hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) itu perlahan-lahan diturunkan, penurunan tekanan tetap sama, tetapi tinggi hamparan berkurang, mengikuti garis *BC* yang diamati pada waktu penambahan kecepatan. Akan tetapi,

tinggi-akhir hampan itu mungkin lebih besar dari nilainya pada hampan diam semula, karena zat padat yang dicurahkan ke dalam tabung itu menetal lebih rapat dari zat padat yang mengendap perlahan-lahan dari keadaan fluidisasi. Penurunan tekanan pada kecepatan rendah lebih kecil dari pada hampan-diam semula. Jika fluidisasi dimulai kembali, penurunan tekanan akan mengimbangi bobot hampan pada titik  $B$ , titik inilah yang harus kita anggap sebagai kecepatan fluidisasi minimum  $U_{mf}$ ; dan bukan titik  $A$ . Untuk mengukur  $U_{mf}$ , hampan itu harus difluidisasikan dengan kuat terlebih dahulu, dibiarkan mengendap dengan mematikan aliran udara, dan laju aliran dinaikkan lagi perlahan-lahan sampai hampan itu mengembang.

### 2.5.3 Jenis-Jenis Fluidisasi

#### 2.5.3.1 Fluidisasi partikulat (*particulate fluidization*)

Dalam fluidisasi padatan pasir dan air, partikel-partikel itu bergerak menjauh satu sama lain, dan gerakannya bertambah hebat dengan bertambahnya kecepatan, tetapi densitas hampan rata-rata pada suatu kecepatan tertentu sama di segala arah hampan. Proses ini disebut “fluidisasi partikulat” (*particulate fluidization*) yang bercirikan ekspansi hampan yang cukup besar tetapi seragam pada kecepatan yang tinggi.

Ketika fluida cairan seperti air dan padatannya berupa kaca, gerakan dari partikel saat fluidisasi terjadi dalam ruang sempit dalam hampan. Seiring dengan bertambahnya kecepatan fluida dan penurunan tekanan, maka hampan akan terekspansi dan pergerakan partikel semakin cepat. Jalan bebas rata-rata suatu partikel di antara tubrukan-tubrukan dengan partikel lainnya akan bertambah besar dengan meningkatnya kecepatan fluida, dan akibatnya porositas hampan akan meningkat pula. Ekspansi dari hampan ini akan diikuti dengan meningkatnya kecepatan fluida sampai setiap partikel bertindak sebagai suatu individu. Proses ini dikenal sebagai fluidisasi partikulat.

#### 2.5.3.2 Fluidisasi gelembung (*bubbling fluidization*)

Hampan zat padat yang terfluidisasi di dalam udara biasanya menunjukkan fluidisasi yang dikenal sebagai fluidisasi agregatif atau fluidisasi gelembung. Fluidisasi ini terjadi jika kecepatan superfisial gas di atas kecepatan

fluidisasi minimum. Bila kecepatan superfisial jauh lebih besar dari  $U_{mf}$ , kebanyakan gas itu mengalir melalui hamparan dalam bentuk gelembung atau rongga-rongga kosong yang tidak berisikan zat padat, dan hanya sebagian kecil gas itu mengalir dalam saluran-saluran yang terbentuk di antara partikel. Partikel itu bergerak tanpa aturan dan didukung oleh fluida, tetapi dalam ruang-ruang di antara gelembung fraksi kosong kira-kira sama dengan pada kondisi awal fluidisasi. Gelembung yang terbentuk berperilaku hampir seperti gelembung udara di dalam air atau gelembung uap di dalam zat cair yang mendidih, dan karena itu fluida jenis ini kadang-kadang dinamai dengan istilah “hamparan didih” (*boiling bed*).

Perilaku hamparan fluidisasi gelembung sangat bergantung pada banyaknya dan besarnya gelembung gas dan ini tidak mudah meramalkannya. Ukuran rata-rata gelembung itu bergantung pada jenis dan ukuran partikel, jenis plat distributor, kecepatan superfisial, dan tebalnya hamparan. Gelembung-gelembung cenderung bersatu, dan menjadi besar pada waktu naik melalui hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) itu dan ukuran maksimum gelembung stabil berkisar antara beberapa inci sampai beberapa kaki diameternya

#### 2.5.4 Parameter-Parameter Fluidisasi

Banyak faktor yang mempengaruhi bagaimana terjadinya fluidisasi, sifat-sifat dan karakteristiknya. Berikut ini parameter-parameter yang mempengaruhi terjadinya fluidisasi.

##### 2.5.4.1 Ukuran partikel

Jika suatu pasir dengan menggunakan proses pengayakan (*sieving*) memiliki ukuran partikel yang terdistribusi dari beberapa ukuran partikel  $d_{pi}$ , maka ukuran partikel pengayakan rata-rata (*mean sieve size*)  $d_p$ :

$$d_p = \frac{1}{\sum x / d_{pi}}$$

yang mana  $x$  adalah fraksi berat partikel pada masing-masing ukuran partikel.

Definisi ukuran partikel rata-rata memberikan penekanan yang sebenarnya terhadap pentingnya pengaruh ukuran kehalusan suatu partikel pasir. Sebaiknya jangan dibingungkan dengan metode penggolongan pasir yang lain, median  $d_{pm}$ .

#### 2.5.4.2 Massa jenis padatan

Massa jenis padatan dapat dibedakan dalam tiga jenis, yaitu *bulk*, *skeletal*, dan *particle density*. Massa jenis borongan (*bulk density*) merupakan pengukuran berat dari keseluruhan partikel dibagi dengan volume partikel. Pengukuran ini menyertakan faktor kekosongan di antara partikel dan kekosongan dalam pori-pori partikel. Massa jenis padatan (*skeletal density*) sesungguhnya adalah densitas dari suatu padatan jika porositasnya nol. Dalam perhitungan hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) biasanya menggunakan massa jenis partikel ( $\rho_p$ ), yang merupakan berat dari suatu partikel dibagi volumenya dan menyertakan lubang atau pori-pori.

#### 2.5.4.3 Sphericity

*Sphericity* ( $\psi$ ) merupakan faktor bentuk yang dinyatakan sebagai rasio dari area permukaan volume partikel bulat yang sama dengan partikel itu dibagi dengan area permukaan partikel.

$$\psi = \frac{d_{sv}}{d_v}$$

Material yang melingkar seperti katalis dan pasir bulat memiliki nilai *sphericity* sebesar 0,9 atau lebih.

#### 2.5.4.4 Bed voidage

*Bed voidage* ( $\epsilon$ ) merupakan faktor kekosongan di antara partikel di dalam hamparan pasir. *Bed voidage* didefinisikan sebagai perbandingan antara selisih volume hamparan dan volume partikel dibagi dengan volume hamparannya. Pada partikel yang tidak memiliki porositas internal, *bed voidage* dapat ditentukan dari massa jenis partikel ( $\rho_p$ ) dan massa jenis borongan pada hamparan ( $\rho_b$ ).

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}$$

#### 2.5.4.5 Kecepatan fluidisasi minimum

Bila gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel padat pasir pada kecepatan rendah, partikel-partikel itu tidak bergerak. Jika kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikkan, partikel-partikel pasir itu akhirnya akan mulai

bergerak dan melayang di dalam fluida, dan gesekan (*friction*) menyebabkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*). Ketika kecepatan gas dinaikkan, penurunan tekanan meningkat sampai besar penurunan tekanan tersebut sama dengan berat hamparannya dibagi dengan luas penampangnya. Kecepatan gas ini disebut kecepatan fluidisasi minimum,  $U_{mf}$ . Kecepatan fluidisasi minimum adalah kecepatan superfisial terendah yang dibutuhkan untuk terjadinya fluidisasi. Jika  $U_{mf}$  tidak dapat ditentukan secara eksperimental, maka gunakan persamaan di bawah ini.

$$Re_{mf} = (1135,7 + 0,0408 \cdot Ar)^{1/2} - 33,7$$

bilangan Reynold terjadinya fluidisasi minimum ( $Re_{mf}$ ) :

$$Re_{mf} = \frac{\bar{d}_p \rho_f U_{mf}}{\mu_f}$$

bilangan *Archimedes* ( $Ar$ ):

$$Ar = \frac{\bar{d}_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2}$$

keterangan :  $U_{mf}$  = kecepatan fluidisasi minimum (  $m/s$  )  
 $\bar{d}_p$  = diameter partikel rata-rata pasir (  $m$  )  
 $\rho_f$  = densitas fluida gas (  $kg/m^3$  )  
 $\rho_p$  = densitas partikel pasir (  $kg/m^3$  )  
 $\mu_f$  = viskositas dinamik fluida gas (  $N \cdot s/m^2$  )  
 $g$  = percepatan gravitasi (  $m/s^2$  )

Pengukuran kecepatan fluidisasi minimum dapat juga diukur berdasarkan data eksperimental dari grafik penurunan tekanan vs kecepatan superfisial berdasarkan data eksperimental dari titik potong antara bagian kurva yang naik dan bagian kurva yang datar seperti pada gambar 2.23.

#### 2.5.4.6 Penurunan tekanan melintas hamparan

Suatu hamparan partikel-partikel pasir memberikan resistansi terhadap aliran fluida yang melaluinya. Jika kecepatan aliran tersebut dinaikkan, maka gaya

seret (*drag force*) yang terjadi pada partikel-partikel tersebut meningkat. Dengan aliran ke atas melalui hamparan yang tidak tenang, partikel-partikel tersebut menyusun kembali sendiri untuk memberikan lebih sedikit resistansi terhadap aliran fluida dan hamparan akan cenderung untuk mengembang. Dengan menaikkan lagi kecepatan aliran ke atas, berkembangnya hamparan akan terus berlanjut sampai suatu kondisi tercapai yang mana gaya seret yang terjadi pada partikel-partikel cukup untuk menopang berat partikel-partikel dalam hamparan. Sehingga penurunan tekanan melintas hamparan ( $\Delta P_b$ ) akan kurang lebih sama dengan berat hamparan per satuan luas.

Persamaan penurunan tekanan melalui distributor melintas hamparan pasir adalah:

$$\Delta P_b = h(\rho_p - \rho_f)(1 - \epsilon)g$$

keterangan :

- $\Delta P_b$  = penurunan tekanan melewati hamparan ( $N/m^2$ )
- $h$  = tinggi hamparan pasir ( $kg$ )
- $\rho_p$  = massa jenis partikel pasir ( $kg/m^3$ )
- $\rho_f$  = massa jenis fluida udara ( $kg/m^3$ )
- $\epsilon$  = *bed voidage*
- $g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

#### 2.5.4.7 Penurunan tekanan melintas distributor

Bila dilihat dari sudut pandang bagaimana udara didistribusikan, maka kebutuhan mendasar adalah merancang suatu distributor sedemikian rupa sehingga udara yang mengalir melewati distributor tersebut mengalami penurunan tekanan yang secukupnya,  $\Delta P_D$ . Jumlah orifis, nozzle, dan sebagainya yang dibutuhkan pada distributor untuk mencapai besar nilai penurunan tekanan ini harus ditentukan dahulu. Kita pertimbangkan dahulu contoh kasus paling sederhana dari sebuah distributor *perforated plate*. Jika kecepatan udara superfisial dalam *windbox* atau ruang plenum adalah  $U_o$  dan *fractional open area* dari distributor (yaitu fraksi dari jumlah total luas bukaan pada aliran udara yang melewati distributor) adalah  $f_{oa}$ , maka kecepatan udara rata-rata melewati orifis adalah:

$$U_{or} = \frac{U_o}{f_{oa}}$$

Sehingga persamaan penurunan tekanan melalui distributor adalah:

$$\Delta P_D = \frac{\rho_f}{2} \left\{ \left( \frac{U_{or}}{C_d} \right)^2 - U_o^2 \right\}$$

yang mana  $\rho_f$  merupakan massa jenis udara dan  $C_d$  merupakan *orifice discharge coefficient*.

*Orifice discharge coefficient* bergantung pada bentuk dari lubang distributor (*orifice*). Terdapat kemungkinan bahwa udara yang melewati lubang distributor menuju hamparan terfluidisasi (*fluidized bed*) mengalami penurunan tekanan yang lebih sedikit dari pada yang tanpa ada partikel atau kosong. Untuk lubang bundar bertepi-persegi dengan diameter  $d_{or}$  jauh lebih besar daripada ketebalan plat distributor  $t$ ,  $C_d$  dapat ditentukan sebesar 0,6. Untuk  $t/d_{or} > 0,09$ ,  $C_d$  dapat diperkirakan menurut korelasi yang diberikan oleh Qureshi dan Creasy:

$$C_d = 0.82 \left( \frac{t}{d_{or}} \right)^{0.13}$$

Keterangan :

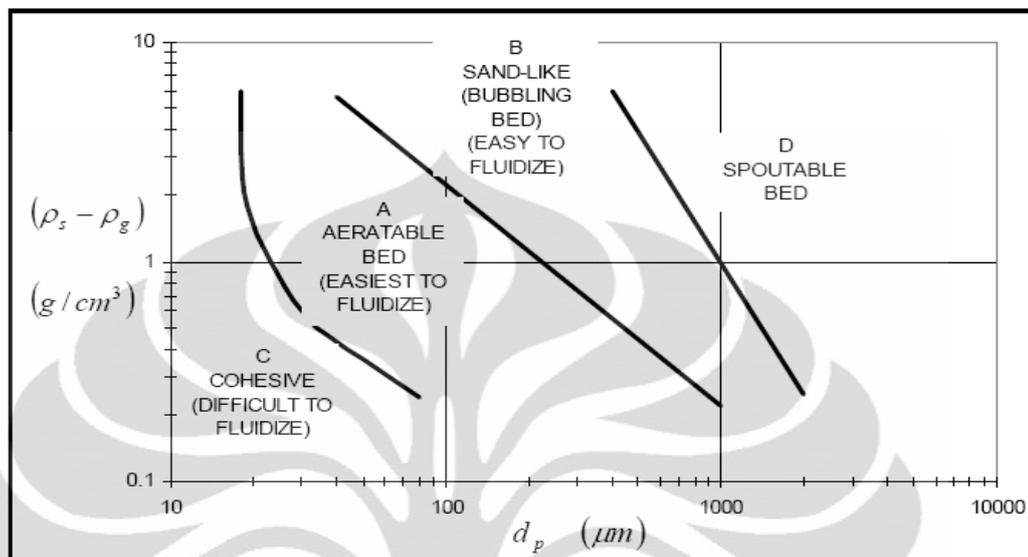
- $\Delta P_d$  = penurunan tekanan melewati distributor ( $N/m^2$ )
- $U_o$  = kecepatan udara superfisial ( $m/s$ )
- $U_{or}$  = kecepatan udara rata-rata melewati orifis ( $m/s$ )
- $f_{or}$  = *fractional open area* ( $m^2$ )
- $\rho_f$  = massa jenis fluida udara ( $kg/m^3$ )
- $C_D$  = *Orifice discharge coefficient*
- $t$  = tebal plat distributor ( $m$ )
- $d_{or}$  = diameter orifis pada distributor ( $m$ )

#### 2.5.4.8 Klasifikasi pasir

Pasir diklasifikasikan berdasarkan bagaimana pasir tersebut terfluidisasi saat dialirkan aliran udara pada kecepatan udara tertentu. Setiap masing-masing kelompok pasir memiliki karakteristik yang berbeda-beda seperti bagaimana terbentuknya gelembung, *solid mixing* yang terjadi, tingkat mengembangnya pasir dan besarnya nilai penurunan tekanan yang semuanya dipengaruhi oleh diameter partikel pasir dan massa jenis pasir tersebut.

Geldart meneliti perilaku tiap-tiap kelompok pasir ketika mengalami fluidisasi. Dia mengategorikan klasifikasi ini dengan cara membuat plot grafik

diameter partikel pasir terhadap selisih antara massa jenis partikel pasir dengan massa jenis udara. Diagram klasifikasi jenis-jenis pasir yang dikelompokkan oleh Geldart dapat dilihat pada gambar.



Gambar 2.24 Diagram Klasifikasi Jenis-Jenis Pasir.

(sumber : Geldart, 1991)

Klasifikasi jenis-jenis pasir menurut Geldart, yaitu :

a) *Group A*

Pasir yang dikategorikan dalam *group A* menurut Geldart biasanya memiliki massa jenis kurang dari  $1400 \text{ kg/m}^3$  dan memiliki ukuran berkisar antara 20 sampai  $100 \mu\text{m}$ . Hampan pasir pada kelompok ini sangat mengembang pada kecepatan udara antara  $U_{mf}$  dan kecepatan yang mana gelembung mulai terjadi,  $U_{mb}$ , karena pasir kelompok ini sedikit kohesif. Pasir jenis ini memperlihatkan suatu peningkatan hampan (*bed*) nyata yang mengembang stabil ketika kecepatan fluidisasi minimum terlampaui, dan fluidisasi dapat terjaga seragam atau fluidisasi partikulat seperti itu bahkan sampai kecepatan fluidisasi minimum telah terlampaui dua sampai tiga kalinya. Tetapi, dengan memperbesar lagi kecepatan udara sampai pada suatu titik yang mana terjadinya hampan mengempis kembali sehingga pada keadaan kurang mengembang yang kira-kira pada tingkat mengembangnya hampan di bawah kondisi fluidisasi minimum dan kebanyakan udara berlebih akan mengalir melalui hampan seperti fase gelembung, yakni yang sering disebut dengan fluidisasi agregatif. Kecepatan

udara pada saat yang mana hamparan mengempis terjadi merupakan kecepatan minimum gelembung (*minimum bubling velocity*,  $U_{mb}$ ).

b) *Group B*

Pasir *group B* menurut Geldart cenderung memiliki ukuran berkisar antara 40 sampai 500  $\mu m$  dan massa jenis berkisar antara 1400 sampai 4000  $kg/m^3$ . Berkebalikan dengan pasir *group A*, gaya antar partikel diabaikan dan gelembung-gelembung mulai terbentuk pada kecepatan fluidisasi minimum atau sedikit lebih di atasnya. Hamparan tersebut akan mengempis dengan sangat cepat ketika suplai udara dihentikan. Kebanyakan gelembung naik lebih cepat dari pada kecepatan udara *interstitial* dan ukuran gelembung meningkat seiring dengan peningkatan tinggi hamparan dan kecepatan udara berlebih ( $U - U_{mf}$ ). Pasir jenis ini memperlihatkan pengembangan hamparan yang kurang stabil; gelembung (fluidisasi agregatif) terjadi pada kecepatan fluidisasi minimum atau sedikit lebih di atasnya. Gelembung cenderung berkembang sampai diameter gelembungnya terbatas oleh ukuran dari hamparan (*bed*) pasir *group B*.

c) *Group C*

Pasir *group C* merupakan pasir yang ukuran rata-ratanya lebih kecil dibandingkan yang lainnya ( $<30 \mu m$ ) dan atau massa jenis yang lebih kecil juga sehingga gaya-gaya antar partikel mempunyai pengaruh yang lebih besar daripada gaya gravitasi. Pasir jenis ini sangat sulit untuk terfluidisasi. Hal ini dikarenakan besar penurunan tekanan sama dengan berat per unit luas. Hal ini menunjukkan bahwa peranan dari berat, bahkan jika hamparan menunjukkan sifat-sifat tampaknya seperti fluida, disokong oleh gaya antar partikel dan persinggungan permukaan partikel. Pada pasir jenis ini, *channelling* sangat mudah terjadi. Sekali hal ini terjadi, maka cenderung memperbesar jalurnya ketika meningkatkan kecepatan udara sehingga udara tidak terdistribusi dengan baik yang mana tidak pernah terjadi benar-benar fluidisasi.

d) *Group D*

Pasir *group D* biasanya memiliki ukuran lebih besar dari pada 600  $\mu m$  dan atau massa jenis yang besar. Walaupun suatu hamparan fluidisasi gelembung (*bubbling fluidized bed*) terlihat sangat turbulen dan dapat digambarkan sebagai

fluidisasi secara turbulen pada saat kecepatan fluidisasi yang lebih tinggi, kondisi aliran udara di dalam celah-celah pasir cenderung menjadi laminar. Pada pasir jenis ini, laju aliran udara *interstitial* yang diperlukan untuk fluidisasi lebih besar daripada kecepatan naiknya gelembung, sehingga aliran udara mengalir ke dasar gelembung dan keluar dari atasnya, yang memberikan suatu cara terjadinya perpindahan udara yang mana hal ini berbeda dengan yang diamati pada pasir *group A* atau *group B*. Kecepatan udara untuk fluidisasi pada pasir yang bermassa jenis besar itu tinggi dan proses *solid mixing* cenderung kurang baik.

Bila gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel *group A, B,* atau *D,* gesekan (*friction*) menyebabkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*). Ketika kecepatan gas dinaikkan, penurunan tekanan meningkat sampai besar penurunan tekanan tersebut sama dengan berat hamparan (*bed*) dibagi dengan luas penampangnya. Kecepatan gas ini disebut kecepatan fluidisasi minimum,  $U_{mf}$ . Ketika batas ini tercapai, hamparan partikel *group A* akan mengembang secara seragam sampai pada kecepatan gas yang lebih tinggi lagi akan terbentuk gelembung-gelembung (*bubbles*); kecepatan ini disebut kecepatan minimum gelembung,  $U_{mb}$ . Untuk partikel *group B* dan *group D* besar  $U_{mf}$  dan  $U_{mb}$  pada dasarnya sama. Partikel *group C* cenderung lebih kohesif dan ketika kecepatan gas dinaikkan lagi maka akan terbentuk semacam saluran atau rongga pada hamparan (*channelling*) dari distributor sampai permukaan hamparan. Jika *channelling* tidak terbentuk, maka seluruh hamparan akan terangkat seperti piston. Semua kelompok partikel pasir ini (*group A, B, C,* dan *D*) ketika kecepatan gas dinaikkan lagi, densitas hamparan akan berkurang dan tubulensi meningkat.

Pada pasir yang lebih halus dan kurang padat (*group A*), ukuran gelembung stabil maksimum jauh lebih kecil daripada pasir yang lebih kasar dan lebih padat (*group B*) sehingga distribusi ukuran gelembung yang stabil dapat dicapai pada hamparan (*bed*) berdiameter yang lebih kecil dengan pasir *group A* daripada *group B*. Karena gelembung yang lebih besar naik lebih cepat daripada gelembung yang lebih kecil, maka udara yang digunakan untuk proses penggelembungan akan lepas dari hamparan dengan lebih cepat saat ukuran gelembung rata-rata lebih besar, sehingga terdapat banyak variasi dalam pengembangan hamparan secara keseluruhan.

Tabel 2.5 *Increasing Size and Density*

(Sumber: Geldart, 1991)

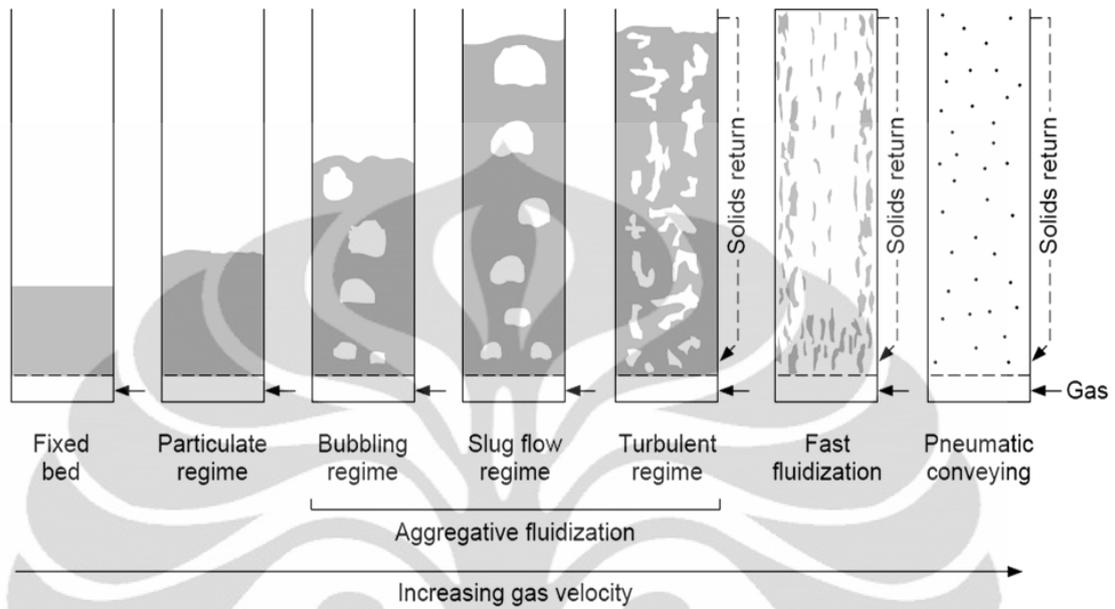
Group	C	A	B	D	
Most obvious characteristic	Cohesive, difficult to fluidize	Bubble-free range of fluidization	Starts bubbling at $U_{mf}$	Coarse solids	
Typical solids	Flour, cement	Cracking catalyst	Building sand, table salt	Crushed limestone coffee beans	
Property					
1. Bed expansion	Low when bed channel, can be high when fluidized	High	Moderate	Low	
2. Deaeration rate	Initially fast, exponential	Slow, linear	Fast	Fast	
3. Bubble Properties	No bubbles. Channels, and cracks	Splitting/recoalescence predominate; maximum size exist, large wake	No limit on size	No known upper size, small wake	
4. Solids mixing <sup>a</sup>	Very low	High	Moderate	Low	
5. Gas backmixing <sup>a</sup>	Very low	High	Moderate	Low	
6. Slug properties	Solids slug	Axisymmetric	Axisymmetric, asymmetric	Horizontal voids, solids slugs, wall slugs	
7. Spouting	No	No, except in very shallow beds	Shallow beds only	Yes, even in deep beds	
	Mean particle size within group	Cohesiveness increases as $d_p$ decreases	Properties improve as size decreases	Properties improve as size decreases	Not known
Effect on properties 1 to 7 of:	Particle size distribution <sup>b</sup>	Not known	Increasing <45 $\mu\text{m}$ fraction improves properties	None	Increases segregation
	Increasing pressure, temperature, viscosity, density of gas	Probably improves	Definitely improves	Uncertain, some possibly	Uncertain, some possibly

<sup>a</sup>At equal  $U-U_{mf}$ .<sup>b</sup>At equal  $d_p$ .

#### 2.5.4.9 Daerah batas fluidisasi (*fluidization regimes*)

Pada kecepatan gas rendah, suatu padatan dalam tabung hampan fluidisasi akan berada dalam keadaan konstan atau tetap. Seiring dengan bertambahnya kecepatan gas, gaya seret mengimbangi berat hampannya sehingga hampan secara menyeluruh ditopang oleh aliran gas tersebut. Pada fluidisasi minimum, hampan memperlihatkan pergerakan yang minimal dan akan sedikit mengembang. Kemudian hampan akan mengembang saat kecepatan aliran gas dinaikkan dan mengalami daerah batas fluidisasi dari *fixed bed* sampai dengan *pneumatic conveying*. Bila kecepatan aliran gas melewati batas fluidisasi turbulen, maka pengembalian kembali partikel (*solids return*) perlu untuk digunakan untuk mempertahankan hampan karena kecepatan gas berada di atas kecepatan terminal dari beberapa atau bahkan semua partikel. Cara

setiap daerah batas fluidisasi tampil berbeda-beda menurut kecepatan aliran gas (gambar 2.25).



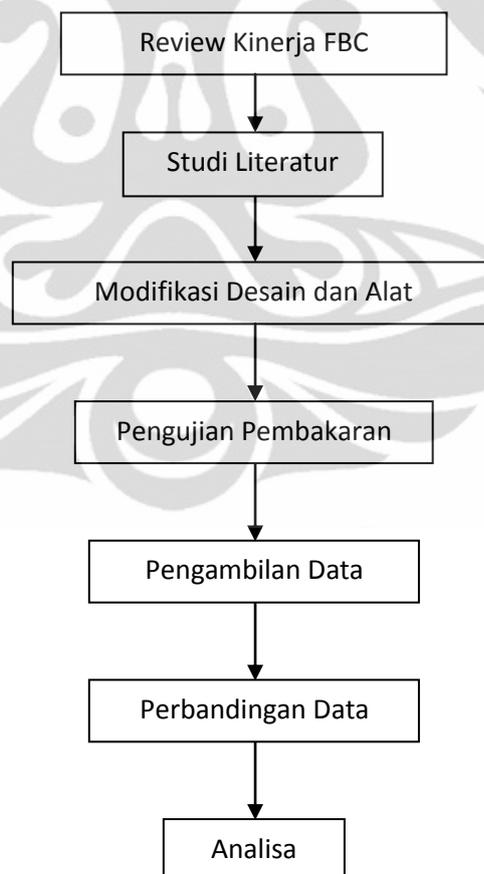
Gambar 2.25 Daerah batas fluidisasi  
(sumber: Grace. 1986)

## BAB 3

### PERSIAPAN DAN PROSEDUR PENGUJIAN

#### 3.1 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian erat kaitannya dengan alat, prosedur, serta desain penelitian yang dipergunakan dalam melaksanakan penelitian. Tahapan penelitian ini mengalir sesuai dengan alur yang logis. Tujuannya adalah memberikan petunjuk yang jelas, teratur dan sistematis. Susunan tahapan ini sangat memengaruhi mutu dan hasil penelitian. Tahapan pada penelitian ini disajikan dalam bentuk diagram agar lebih mudah dipahami.



### **3.1.1 Review Kinerja FBC**

Pada awal penelitian, kinerja fbc versi paling mutakhir (Februari 2011) dievaluasi. Peninjauan ulang kinerja ini termasuk memerhatikan fenomena fluidisasi dengan pasir mesh 30 yang digunakan, serta letak distributor yang relatif jauh dari burner.

### **3.1.2 Studi Literatur**

Studi literatur yang dilakukan adalah melalui skripsi-skripsi yang pernah ditulis sebelumnya mengenai proyek fluidized bed combustor ini. Selain itu, dilakukan pula pendalaman materi melalui referensi-referensi buku teks.

### **3.1.3 Modifikasi Desain dan Alat**

Setelah melakukan tinjauan ulang dan studi literatur, dilakukan beberapa modifikasi dan pergantian alat. Pasir dengan mesh 30 dirubah menjadi pasir dengan partikel lebih kecil yaitu dengan ukuran mesh 40-50. Hal ini dilakukan melihat fluidisasi yang lebih baik dengan pasir dengan partikel lebih kecil. Selain itu juga dilakukan pergantian desain distributor pada fbc. Desain distributor yang baru memiliki diameter lubang yang sama, namun ditinggikan, sehingga hamparan pasir bisa menjadi lebih dekat dengan burner sehingga diharapkan pemanasan awal dapat dicapai dengan lebih cepat. Pada penelitian ini, percobaan lebih fokus pada pengaruh suplai udara,

### **3.1.4 Pengujian Pembakaran & Pengambilan Data**

Pengujian dilakukan beberapa kali, namun tidak semua diambil datanya sebagai bahan penelitian. Sebagian pengujian ditujukan untuk melihat pengaruh fluidisasi, sebagian lagi hanya untuk memastikan semua alat berjalan dengan benar sebelum pengujian dilakukan. Pengujian yang diambil datanya dilakukan tiga kali, masing masing dengan variasi sendiri-sendiri. Pengujian variasi pertama dilakukan pada tanggal 21 Mei 2011, pengujian ini dilakukan dengan fluidisasi maksimum yaitu pada suplai udara 0,095 m<sup>3</sup>/s. Pengujian kedua dilakukan pada tanggal 29 Mei 2011, pengujian ini dilakukan dengan suplai udara yang lebih kecil yaitu 0,085 m<sup>3</sup>/s. Pengujian terakhir dilakukan pada tanggal 2 Juni 2011,

pengujian kali ini tidak melakukan variasi pada suplai udara, melainkan variasi pada jenis bahan bakar yang digunakan. Pada percobaan ini, suplai udara yang digunakan adalah 0,095 m<sup>3</sup>/s. Setelah pemanasan awal menggunakan batok kelapa, proses *self combustion* dilanjutkan dengan mencampur ranting ke dalam ruang bakar sedikit demi sedikit. Awalnya ranting yang dimasukkan sebanyak 20% berbanding 80% cangkang kelapa. Namun lama kelamaan komposisi ranting bertambah hingga pada akhirnya menggunakan bahan bakar 100% ranting.

### 3.1.5 Perbandingan Data & Analisa

Sesuai judul penelitian, data yang diambil sebagai bahasan pada penelitian ini adalah percobaan pertama pada 21 Mei 2011. Percobaan dilakukan dengan menggunakan *bed* dengan partikel berukuran *mesh* 40-50. Hasil yang didapat kemudian dianalisa untuk kemudian dilihat karakteristik pembakaran yang terjadi. Sebagai pembandingan, digunakan data dari percobaan periode sebelumnya yang dilakukan pada Desember 2010. Karakteristik yang dibandingkan adalah persebaran temperatur pada saat kondisi kerja sedang berlangsung.

## 3.2 Persiapan Pengujian

### 3.2.1 Bahan Bakar Biomassa

Energi biomassa adalah energi yang didapatkan dari sinar matahari yang kemudian ditangkap oleh materi organik seperti tumbuhan ataupun hewan. Sumber dari biomassa terdiri dari :

1. Residu dari perhutanan (sampah hijau dari limbah penggergajian kayu, dan juga limbah *vegetative* dan kayu).
2. Tumbuhan pertanian yang khusus ditujukan untuk kepentingan energi dan juga limbah agrikultur.
3. Konstruksi kayu dan limbah reruntuhan kayu.
4. Kotoran binatang
5. Limbah etanol
6. Limbah perkotaan dalam bentuk limbah padat (sampah lumpur atau materi organik)
7. Gas dari dalam tanah

## 8. Limbah industri yang lainnya (sampah kertas dari proses daur ulang)

Tempurung kelapa merupakan salah satu contoh biomassa. Tempurung kelapa adalah bagian buah kelapa yang memiliki fungsi biologis sebagai pelindung inti buah dan terletak di bagian sebelah dalam sabut kelapa dengan ketebalan 3-6 mm.



Gambar 3.1 Tempurung kelapa  
(Sumber: [www.bahanbakuindustri.com](http://www.bahanbakuindustri.com))

Tempurung kelapa merupakan salah satu biomassa yang mudah didapatkan di Indonesia. Dalam satu tahun, Indonesia dapat menghasilkan 1,1 juta ton tempurung kelapa.

Tabel 3.1 Potensi biomassa di Indonesia  
(Sumber: [esptk.fti.itb.ac.id](http://esptk.fti.itb.ac.id))

Sumber/jenis limbah	Produksi	Potensi Kalor (juta GJ/tahun)
Peremajaan kebun karet	31,0 juta ton/tahun	496,0
Sisa logging	1,15 juta ton/tahun	11,0
Limbah industri penggergajian kayu	1,1 juta ton/tahun	10,6
Tandan kosong kelapa sawit	3,5 juta ton/tahun	15,4
Sabut sisa buah sawit	3,7 juta ton/tahun	35,3
Cangkang buah sawit	1,3 juta ton/tahun	17,2
Bagas tebu	6,5 juta ton/tahun	78,0
Sekam padi	14,3 juta ton/tahun	179,0
Tempurung kelapa	1,1 juta ton/tahun	18,7
Sabut kelapa	2,0 juta ton/tahun	24,0

Proses pengolahan tempurung kelapa yang masih merupakan bahan baku menjadi tempurung kelapa yang siap menjadi bahan bakar diperlukan dua proses, yakni pelepasan sabut dan pencacahan tempurung kelapa tersebut menjadi bagian-bagian kecil untuk memudahkannya menjadi bahan bakar dalam proses FBC

Tempurung kelapa (*coconut shell*) yang digunakan disini ialah dari jenis buah kelapa pada umumnya yang biasa dipakai olah masyarakat dan bukan jenis kelapa sawit. Untuk melakukan pengujian pembakaran, tempurung kelapa yang digunakan memiliki ukuran sebagai berikut :

Partikel kecil	:	panjang = 5 – 10 mm
		lebar = 5 – 10 mm
		tebal = 3 – 5 mm



Gambar 3.2 Tempurung kelapa partikel kecil

(Sumber: Laboratorium FBC UI)

### 3.2.2 Pasir

Pasir yang digunakan akan sangat berpengaruh terhadap berhasil tidaknya proses fluidisasi dan pembakaran yang akan dilakukan. Dalam menentukan jenis pasir yang akan digunakan pada alat FBC UI ini sebaiknya menggunakan pasir silika atau pasir kuarsa untuk tujuan mendapatkan fluidisasi yang baik dengan densitas partikelnya kurang lebih sebesar  $2600 \text{ kg/m}^3$ . Pasir silika dan pasir kuarsa juga memiliki nilai *specific heat* (kalor jenis) yang kecil sehingga sangat baik dalam menyimpan kalor. Karena semakin kecil nilai *specific heat* suatu material maka akan semakin mudah untuk menaikkan temperatur material tersebut. Dengan massa dan besar kenaikan temperatur yang sama, dua material yang

berbeda dengan nilai kalor jenis yang jauh berbeda akan memiliki besar jumlah kalor yang jauh berbeda pula untuk menaikkan temperaturnya.

Sebagai perbandingan nilai *specific heat* untuk substansi-substansi yang lain dapat dilihat pada tabel 3.1. Pasir silika memiliki titik lebur yang tinggi sampai mencapai temperatur sekitar 1800 °C sehingga sangat cocok digunakan untuk aplikasi *fluidized bed combustor* yang *range* operasinya berada pada temperatur tinggi. Sifat fisik, termal dan mekanik pasir silika dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 *Specific Heat* berbagai substansi

(Sumber: <http://www.azom.com/>)

<i>Substansi</i>	<i>Specific Heat</i> ( cal/gram.°C )	<i>Specific Heat</i> ( J/kg.°C )
air (murni)	1,00	4186
lumpur basah	0,60	2512
es (0 °C)	0,50	2093
lempung berpasir	0,33	1381
udara kering (permukaan laut)	0,24	1005
pasir silika	0,20	838
pasir kuarsa	0,19	795
granit	0,19	794

Tabel 3.3 Sifat fisik, termal, dan mekanik pasir silika

Sumber: <http://www.azom.com/>

<i>Properties</i>	<i>Silica Sand</i>
<i>Particle density ( kg/m<sup>3</sup> )</i>	2600
<i>Bulk density ( kg/m<sup>3</sup> )</i>	1300
<i>Thermal conductivity ( Wm<sup>-1</sup>K )</i>	1.3
<i>Tensile strength ( MPa )</i>	55

<i>Compressive strength ( MPa )</i>	2070
<i>Melting point ( °C )</i>	1830
<i>Modulus of elasticity ( GPa )</i>	70
<i>Thermal shock resistance</i>	<i>Excellent</i>

Setelah memilih jenis pasir yang digunakan, maka ditentukan ukuran diameter partikel pasir yang digunakan pada FBC UI. Jenis pasir yang digunakan sudah pasti antara pasir silika dan pasir kuarsa. Menurut pengklasifikasian partikel pasir oleh Geldart seperti yang telah dijelaskan pada bab dua, maka jenis partikel pasir tersebut terkelompok dalam *group B* dan *group D*. Namun partikel pasir dalam *group D* membutuhkan kecepatan fluidisasi yang besar sehingga sangat sulit untuk mendapatkan pencampuran yang baik bila dibandingkan dengan pasir *group A* dan *group B*. Dengan demikian partikel pasir yang paling baik digunakan untuk aplikasi *fluidized bed combustor* ini adalah partikel pasir *group B* dengan ukuran diameter partikel pasir yang paling baik untuk tujuan fluidisasi berkisar antara 300  $\mu\text{m}$  sampai 500  $\mu\text{m}$ .

Pasir yang terpilih tersebut kemudian diperoleh dengan melakukan pengayakan bertingkat. Ayakan (*sieve*) bertingkat digunakan untuk melakukan pengamatan terhadap nomor kehalusan butiran (*grain fineness number*), dan dapat dilihat seperti pada tabel 3.3 yang mana terdapat ukuran lubang ayakan (*mesh*) menurut standar di Amerika. Berdasarkan tabel tersebut maka partikel pasir yang berkisar antara 300  $\mu\text{m}$  sampai 500  $\mu\text{m}$  adalah partikel pasir dengan ukuran diameter partikel pasir antara *mesh 35* sampai *mesh 50*.

Tabel 3.4 Distribusi ukuran pengayakan pasir silika

*Sumber: AGSCO silica sand technical data sheet*

Sieve Size		Individual Percent Retained				
US	$\mu\text{m}$	16-30	20-40	30-50	40-70	50-80
16	1180	1.4				
20	850	35.7	2.3			
25	725	58	19.7	2.3		

30	600	4.7	28	10.4	0.3	
35	500	0.2	30.3	17.1	5.2	
40	425		15.8	31.9	16.5	2.7
50	300		3.6	29.2	37	39.3
60	250		0.3	4.7	14.2	23.8
70	212			2.3	9.3	16.2
80	180			2.1	5.5	9.1
100	150				7.2	5.4
120	125				4.8	3.5

Oleh karena itu, digunakanlah pasir silika dengan ukuran mesh 40-50, karena bila menggunakan pasir silika dengan ukuran mesh 30 masih terlalu besar dari yang diinginkan dan bila menggunakan pasir silika dengan ukuran mesh 40-70 akan terlalu halus.



Gambar 3.3 Pasir silika mesh 40-50 yang digunakan pada FBC UI

(Sumber: Laboratorium FBC UI)

Beberapa keterangan yang harus diperhatikan ialah spesifikasi kondisi dari hampan pasirnya, yaitu :

- massa jenis partikel pasir ( $\rho_p$ ) =  $2600 \text{ kg/m}^3$
- massa jenis borongan pasir ( $\rho_b$ ) =  $1300 \text{ kg/m}^3$
- diameter hampan pasir ( $d_b$ ) =  $63,5 \text{ cm} = 0,635 \text{ m}$
- tinggi hampan pasir (*bed height*) =  $7,5 \text{ cm} = 0,075 \text{ m}$

### 3.2.3 Perlengkapan dan Peralatan

Selain bahan bakar biomassa dan juga pasir, ada beberapa perlengkapan dan peralatan yang digunakan untuk berlangsungnya pengujian dan pengambilan data yang baik dan benar, yaitu :

#### 1. Generator Set

*Generator set* (genset) ini adalah satu-satunya sumber tegangan untuk pengoperasian seluruh alat FBC ini, dan dapat memberikan daya listrik sebesar 4 kVA.



Gambar 3.4 Generator set yang digunakan  
(Sumber: Laboratorium FBC UI)

Berikut ini spesifikasi dari genset dengan merk Starke GFH 6900 LXE tersebut :

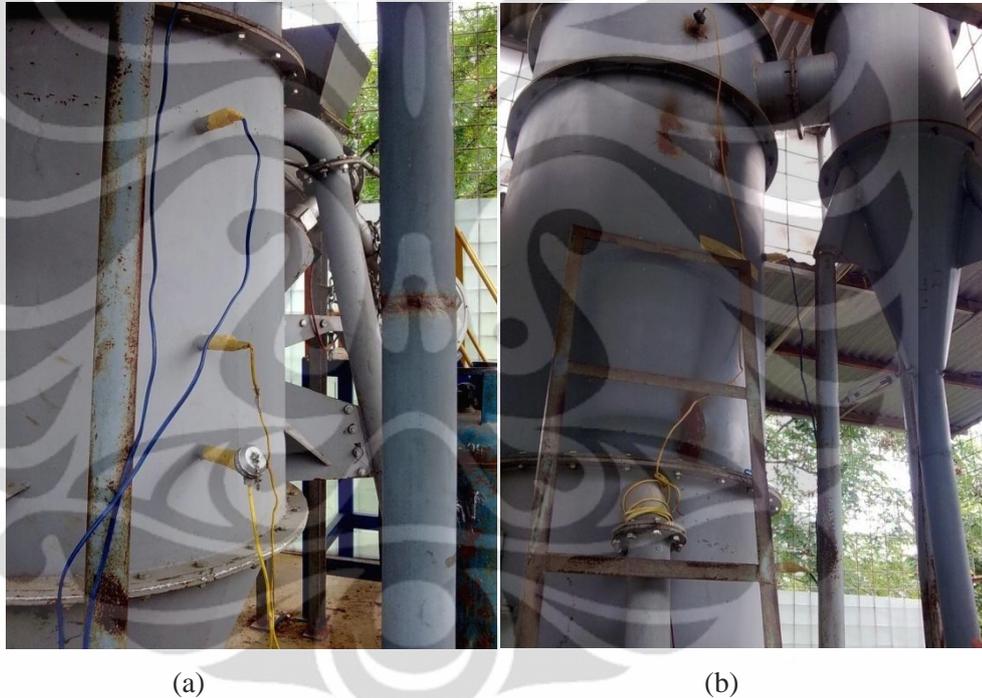
- *rated voltage* : 220 V
- *rated frequency* : 50 Hz
- *peak power* : 4 kVA
- *rated power* : 3,5 kVA
- *power factor* : 1,0
- *fuel consumption* : 2 litre / hour (bensin)

#### 2. Termokopel

Jenis termokopel yang digunakan di sini adalah termokopel tipe K. Lima termokopel yang ada sebelumnya sudah dikalibrasi oleh mahasiswa peneliti untuk

keperluan skripsi di lab gasifikasi. Termokopel itu dimasukkan satu persatu pada reaktor FBC dengan konfigurasi ketinggian yang berbeda-beda diukur dari batas tengah distributor FBC yang ada (T2 paling dekat dengan hamparan pasir dan T5 paling jauh dari hamparan pasir. Sedangkan T1 berada di bawah distributor), yaitu

- T2 = 20,5 cm = 0,205 m
- T3 = 41,5 cm = 0,415 m
- T4 = 80,5 cm = 0,805 m
- T5 = 161,5 cm = 1,615 m



Gambar 3.5 Konfigurasi termokopel: (a). T1 - T3, dan (b). T4 - T5

(Sumber: Laboratorium FBC UI)

### 3. *Temperature Data Logger*

Untuk mendapatkan data-data keluaran dari distribusi temperaturnya digunakan *temperature data logger* sebagai pengkonversi suhu dari analog ke digital yang kemudian akan ditampilkan pada layar *display* yang ada.



Gambar 3.6 *Temperature data logger*

(Sumber: Laboratorium FBC UI)

#### 4. Timbangan (*weight scale*)

Timbangan digunakan untuk mengukur massa dari bahan bakar baik cangkang kelapa ataupun ranting pohon yang digunakan untuk pembakaran dan untuk mengukur massa hamparan pasir yang akan digunakan.



Gambar 3.7 Timbangan dengan skala maksimum 5 kg

(Sumber: Laboratorium FBC UI)

### 5. Control Panel

Panel kontrol ini berfungsi sebagai pengontrol dan pengatur dari putaran motor feeder dan putaran blower yang akan dioperasikan. Pada panel kontrol ini terdapat dua *inverter* yang memiliki *switch* masing-masing. *Inverter* atau yang dikenal juga sebagai *variable-frequency drives* merupakan alat untuk pengontrol kecepatan yang akurat dan pengontrol putaran dari motor tiga fase. *Inverter* bekerja dengan merubah sumber tegangan menjadi DC dan merubah DC menjadi sumber listrik tiga fase yang sesuai untuk motor. *Inverter* yang digunakan bermerk Toshiba dan LG. Spesifikasinya untuk listrik AC 200 – 230 V dan untuk daya motor sampai 5,4 hp.



Gambar 3.8 *Control panel* yang digunakan untuk feeder dan blower  
(Sumber: Laboratorium FBC UI)

## 3.3 Standar Operasi Alat Pengujian

### 3.3.1 Sistem Feeder

Sistem feeder ini berfungsi untuk memasukkan bahan bakar ke dalam ruang bakar secara konstan dan terus-menerus. Mekanisme yang digunakan ialah jenis *screw feeder* yang digerakkan oleh sebuah motor listrik yang menggunakan *gear reducer* dan dua buah *sprocket* yang dihubungkan dengan rantai. *Feeder* ini memiliki *hopper* dan konfigurasi yang horizontal dan kemudian ada kemiringan ke bawah agar bahan bakar dapat turun masuk ke dalam reaktor.



Gambar 3.9 Sistem feeder pada *fluidized bed combustor* UI  
(Sumber: Laboratorium FBC UI)

Berikut ini beberapa spesifikasi pada sistem feeder tersebut :

- CHENTA 3 phase induction motor type CT 80-4B5 :

Tabel 3.5 Spesifikasi motor feeder

(Sumber: [www.chenta.com](http://www.chenta.com))

HP	kW	V	A	Freq.
1	0,75	220	3,18	50

- CHENTA gear speed reducer type MHFI :
  - Size : 37
  - Ratio : 30
- Rasio *sprocket* :
  - jumlah gigi pada motor = 16
  - jumlah gigi pada *screw feeder* = 24

Untuk dapat mengoperasikan sistem feeder dengan baik dan benar, maka harus diketahui urutan tahap-tahap yang harus dilakukan, yaitu :

1. Pastikan bahwa kabel motor feeder sudah terhubung dengan tepat ke panel kontrol untuk feeder, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.

2. Sambungkan konektor dari panel kontrol ke generator set yang sudah menyala untuk mendapatkan sumber tegangan. Gunakan *test pen* untuk memastikan sisi konektor terhubung dengan sisi *generator set* yang benar.
3. Aktifkan *switch* utama dan *circuit breaker* dengan menekan ke arah atas, lampu di pintu panel akan menyala.
4. Tekan *switch* berwarna hitam sebelah kiri ke arah bawah agar *inverter* motor *feeder* menyala.
5. Putar pengendali putaran motor *feeder* sesuai yang diinginkan (*rpm* maksimum 50 *rpm*).
6. Jika sudah selesai dan ingin mematikan *feeder*, maka putar kembali pengendalinya ke nol lagi, dan matikan semua *switch* pada panel kontrol.

Namun pada percobaan ini sistem *feeder* tidak digunakan. Hal ini dikarenakan listrik yang tersedia dari *generator set* tidak mencukupi untuk menyuplai kebutuhan listrik untuk seluruh sistem *fluidized bed combustor* UI. Untuk mengatasi hal ini, bahan bakar dimasukkan melalui pintu pada bagian *feeder* yang mengarah ke ruang bakar, sehingga bahan bakar langsung turun ke dalam ruang bakar.

### 3.3.2 Blower

Blower digunakan sebagai alat untuk menyuplai udara yang dibutuhkan agar terjadi proses fluidisasi dan juga terjadi reaksi pembakaran secara terus menerus selama pengoperasian alat berlangsung. Blower tersebut berfungsi untuk mengalirkan udara ke reaktor dengan debit tertentu sehingga pasir silika yang ditopang dengan plat distributor tersebut terfluidisasi. Blower harus dapat memberikan aliran udara dengan kecepatan aliran yang mencukupi sehingga terjadi fluidisasi, dan sebagai tolok ukurnya dapat dilihat dari kecepatan fluidisasi minimum. Selain harus dapat mengalirkan udara dengan kecepatan udara setidaknya sebesar kecepatan fluidisasi minimumnya, blower harus juga dapat memberikan tekanan yang lebih besar dari pada nilai *pressure drop* (penurunan tekanan) saat melewati distributor dan hamparan pasir.



Gambar 3.10 Ring blower pada *fluidized bed combustor* UI

(Sumber: Laboratorium FBC UI)

Spesifikasi dari blower yang digunakan adalah sebagai berikut ini :

Tabel 3.6 Spesifikasi teknis ring blower

<i>Phase</i>	3 Ø
<i>Frequency ( Hz )</i>	50 / 60
<i>Power ( kW )</i>	2,2
<i>Voltage ( V )</i>	220
<i>Current ( A )</i>	8
<i>Pressure (max) ( mm H<sub>2</sub>O )</i>	2800
<i>Air Flow (max) ( m<sup>3</sup>/min )</i>	6,2
<i>Inlet / Outlet Pipe</i>	2"
<i>Weight ( kg )</i>	35

Untuk prosedur penggunaan ring blower tersebut, dapat dilakukan dengan mengikuti tahap-tahap berikut ini :

1. Pastikan bahwa kabel dari blower sudah terhubung dengan tepat ke panel kontrol untuk blower, sambungkan setiap kabel sesuai dengan warnanya.

2. Sambungkan konektor dari panel kontrol ke generator set yang sudah menyala untuk mendapatkan sumber tegangan. Gunakan *test pen* untuk memastikan sisi konektor terhubung dengan sisi *generator set* yang benar.
3. Lalu aktifkan *switch* utama dan *circuit breaker* dengan menekan ke arah atas, lampu di pintu panel akan menyala.
4. Tekan *switch* berwarna hitam sebelah kanan ke arah bawah agar *inverter blower* menyala.
5. Tekan tombol atas ataupun bawah untuk mencari set untuk putaran (*rpm*), lalu tekan tombol *enter* di bagian tengah.
6. Tekan tombol di pintu panel sebelah kanan agar menyala hijau, kemudian atur besarnya *rpm* yang diinginkan dengan memutar-mutar pengendali blower yang ada di pintu panel di atas tombol berwarna hijau tersebut.
7. Jika sudah selesai dan ingin mematikan blower, putar pengendali ke nol lagi dan matikan semua *switch* pada panel kontrol.

### 3.3.3 Sistem Burner

*Burner* yang dipakai di *fluidized bed combustor* UI saat ini ialah jenis *hi-temp premixed burner* yang berfungsi sebagai alat pemberi kalor atau pemanas untuk menaikkan temperatur pasir saat melakukan *start up* awal pengujian pembakaran. Akan tetapi, setelah mencapai suhu yang cukup tinggi di ruang bakar, maka burner dapat dimatikan. Untuk dapat melakukan pengoperasian burner ini dengan baik maka perlu diketahui urutan langkah-langkah yang dilakukan dalam penyalaan dan mematikan *hi-temp premixed burner* ini. Prosedur mengoperasikan burner ini adalah sebagai berikut :

1. Buka *ball valve* utama gas masuk.
2. Atur tekanan kerja gas pada 20~30 mbar (200 ~ 300 mm H<sub>2</sub>O).
3. Putar saklar *burner control* ke posisi *on* untuk mengaktifkan *burner control*. Pada tahap awal, *burner control* melakukan pengecekan status awal apakah ada tekanan udara palsu dan apakah ada api yang terdeteksi *UV sensor*. Bila gejala ini ditemukan, maka indikator burner *misfire* dan lampu merah reset akan menyala.

4. Blower akan berputar untuk menghasilkan tekanan yang stabil. Apabila tekanan blower di bawah nilai setting dari *air pressure switch* maka sistem akan di *cut-off* dan indikator *cut-off* akan menyala.
5. Setelah 10 detik proses *pre-purge* yang berguna untuk mengusir gas yang terperangkap (bila ada), maka *solenoid valve* untuk gas akan membuka. Pada saat bersamaan *ignition trafo* bekerja untuk membentuk *spark* listrik pada elektroda busi. Pertemuan campuran udara dan gas dengan percikan listrik akan menghasilkan nyala api. Atur besarnya volume gas untuk api pilot dengan memutar *needle valve* sampai api menyala konsisten.
6. *UV sensor* akan mendeteksi nyala api dan mengirim sinyal ke *burner control*. *Burner control* akan tetap membuka *solenoid valve* sehingga api tetap menyala. Tapi bila pembacaan *UV sensor* kurang maka sistem akan di *cut-off* menjadi *misfire*. Bila hal ini terjadi, segera cari tahu apa penyebabnya dan segera tangani. Ulangi urutan proses (*sequence*) dari awal dengan menekan tombol reset atau memutar saklar *burner control* ke posisi *off* lalu nyalakan lagi dari awal.
7. Setelah nyala api terbentuk dapat dilakukan penyetelan untuk mendapat mutu nyala api yang bagus dan panjang api yang diinginkan.
8. Jika ingin mematikan burner, putar saklar burner ke posisi *off* dan pastikan bahwa api burner sudah mati semua.
9. Tutup *ball valve* utama gas masuk dan tutup katup utama pada tabung gas LPG.

Penyetelan *hi-temp premixed burner* juga perlu dilakukan untuk dapat mengatur mutu nyala api dan panjang nyala api yang diinginkan. Mekanisme penyetelan burner adalah seperti berikut ini :

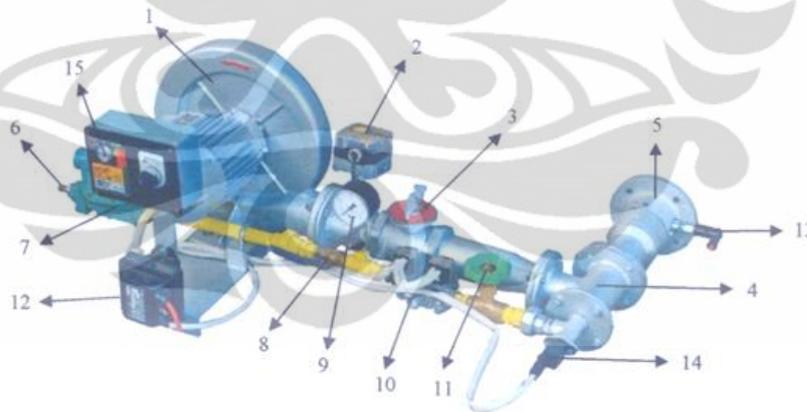
- Penyetelan mutu api :
  - a. Atur volume gas yang mengalir:
 

Putar bagian knop *needle valve*:

    - Searah jarum jam : *flow* gas berkurang (-), api berubah menjadi lebih merah.
    - Berlawanan jarum jam : *flow* gas bertambah (+), api menjadi lebih ke biru.

- b. Atur manual *air damper* pada posisi buka setengah yaitu skala nomor 5. Posisi ini bisa diatur lebih lanjut untuk mendapatkan komposisi udara dan gas yang tepat untuk membentuk mutu nyala api yang bagus. Kencangkan baut pengunci supaya posisi *damper* tidak berubah.
- Penyetelan panjang api :
    - a. Atur *gas regulator* sehingga tekanan kerja antara 20~30 *mbar* (200~300 *mmH<sub>2</sub>O*).
    - b. Buka tutup dan putar penyetel :
      - Searah jarum jam : tekanan gas bertambah (+), panjang api berubah menjadi lebih panjang.
      - Berlawanan jarum jam : tekanan gs berkurang (-), api menjadi lebih pendek.
    - c. Selanjutnya atur kembali *damper* udara untuk mendapatkan mutu nyala api yang bagus.

Berikut ini diperlihatkan komponen-komponen dari burner dan spesifikasi teknisnya :



Gambar 3.11 Bagian-bagian *hi-temp premixed burner*

(Sumber: [www.ostenco.co.id](http://www.ostenco.co.id))

- Keterangan :
- |                        |                                |
|------------------------|--------------------------------|
| 1. Blower              | 9. Gas pressure gauge          |
| 2. Air pressure switch | 10. Combination solenoid valve |
| 3. Air damper          | 11. Gas needle valve           |
| 4. Premixer            | 12. Ignition trafo             |
| 5. Head burner         | 13. Spark plug                 |

- |                         |                    |
|-------------------------|--------------------|
| 6. Gas inlet            | 14. UV sensor      |
| 7. Gas second regulator | 15. Burner control |
| 8. Gas main valve       |                    |

Tabel 3.7 Spesifikasi teknis *Hi-Temp Premixed Burner*(Sumber: [www.ostenco.co.id](http://www.ostenco.co.id))

Burner	Kapasitas	75000 <i>kcal/jam</i>
	Bahan Bakar	LPG atau LNG
Tekanan Gas Masuk	LPG	0,69 <i>bar</i> maks
	LNG	1 <i>bar</i> maks
Konsumsi Bahan Bakar	LPG	3,5 <i>m<sup>3</sup>/jam</i> maks
	LNG	8 <i>m<sup>3</sup>/jam</i> maks
Blower	Tekanan Statik	200-300 <i>mmH<sub>2</sub>O</i>
	Debit Aliran	2,5 <i>m<sup>3</sup>/min</i>
Sumber Daya	Sistem Burner	220 V; 0,75 <i>kW</i>

### 3.4 Prosedur Pengujian Pembakaran

Pengujian pembakaran dengan bahan bakar biomassa (cangkang kelapa) yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan karakteristik distribusi panas serta daya panas yang dihasilkan pada alat *fluidized bed combustor* UI dengan melihat hubungan-hubungan antara temperatur di setiap titik termokopel tiap satuan waktu, ketinggian termokopel, ukuran partikel pasir, ketinggian distributor serta lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan sebuah pengujian ini sampai selesai.

#### 3.4.1 Rangkaian Alat Pengujian

Untuk dapat melakukan pengujian dengan baik dan benar maka harus diperhatikan juga bagaimana rangkaian alat eksperimen tersebut disusun secara keseluruhan (*Overall setup*). Penjelasannya adalah sebagai berikut :

- Panel kontrol dihubungkan ke generator set untuk mendapatkan sumber tegangan yang cukup.
- Sistem feeder terhubung ke panel kontrol agar dapat diatur putarannya.
- Blower juga terhubung ke panel kontrol agar dapat diatur putarannya.
- Burner terhubung ke generator set agar dapat memutar blower burner dan menyalakan busi.
- Blower dihubungkan ke area di bawah distributor dan pasir (area *plenum*) menggunakan selang untuk mengalirkan udara.
- Termokopel terletak di lima titik ketinggian pada ruang bakar dan *freeboard area* (area di atas pasir) dengan ketinggian yang sudah disebutkan di sub bab persiapan sebelumnya.
- Termokopel terhubung ke *temperature data logger*, dan *data logger* juga terhubung ke generator set untuk dapat membaca nilai suhunya di setiap termokopel.
- Untuk posisi masing-masing alat diletakkan dengan sebaik mungkin, sehingga tidak ada kabel yang tertekan, terikat, ataupun tertarik. panel kontrol diletakkan dengan sebaik mungkin agar dapat dengan mudah melakukan pengaturan.



Gambar 3.12 Rangkaian seluruh alat untuk melakukan pengujian pembakaran  
(Sumber: Laboratorium FBC UI)

### 3.4.2 Prosedur Pengambilan Data Pembakaran

Dalam melakukan pengujian pembakaran dan pengambilan data untuk *fluidized bed combustor* UI harus dilakukan dengan metode yang optimal, sehingga hasil atau data-data yang didapat menjadi lebih akurat dan benar. Keseluruhan langkah-langkah yang dilakukan dari awal setelah persiapan dan sebelum pengambilan data sampai setelah pengambilan data akan dijelaskan berikut ini.

#### 3.3.2.1 Prosedur pemanasan awal pembakaran

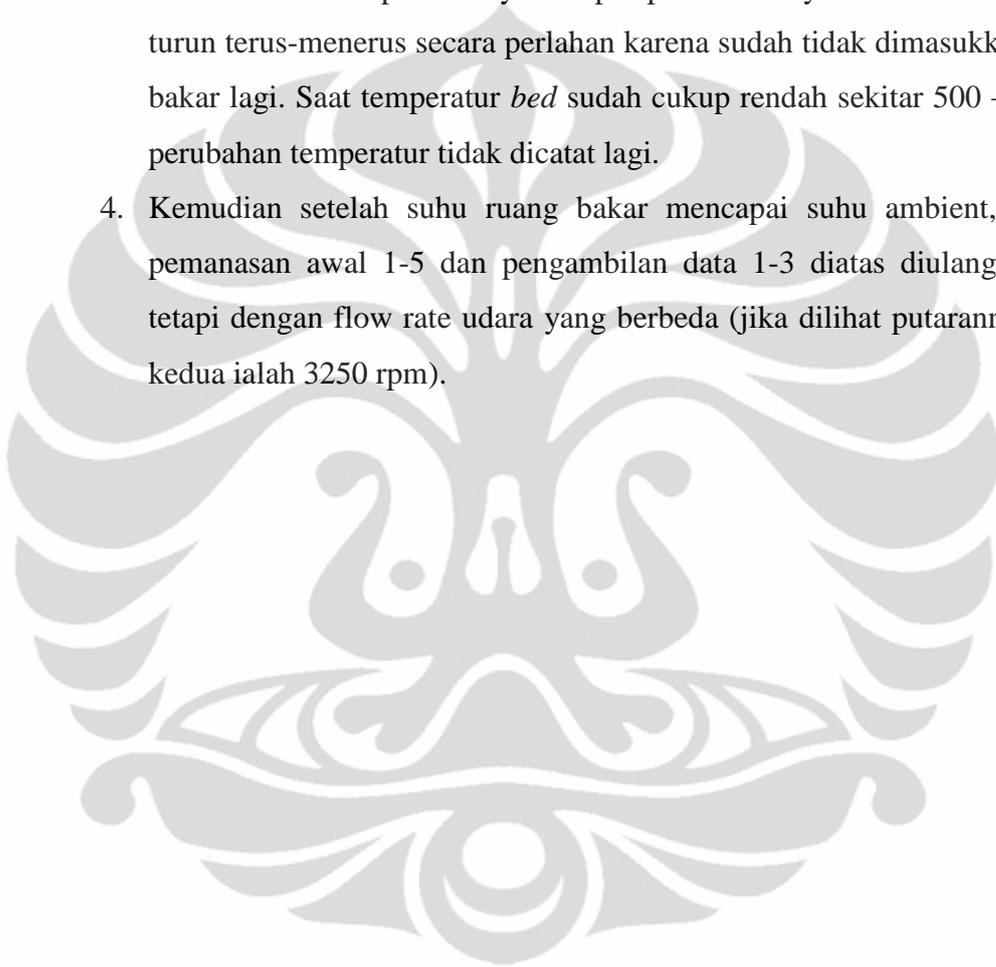
1. Pastikan semua persiapan, rangkaian dan posisi alat sudah dilakukan dengan benar sesuai dengan yang sudah disebutkan sebelumnya.
2. Menyalakan blower sebagai penyedia udara saat menyalakan burner dan saat proses pembakaran berlangsung, serta untuk proses fluidisasi pasir agar panasnya tersebar merata di seluruh pasir. Digunakan dua flow rate udara yang berbeda (jika dilihat putarannya, yang pertama ialah 3000 rpm).
3. Menyalakan *burner* untuk memanaskan *bed* (pasir) hingga *bed temperature* mencapai suhu sekitar 400 °C.
4. Setelah itu memasukkan solid fuel berupa cangkang kelapa ke dalam ruang bakar sampai temperatur *bed* mencapai suhu sekitar 750 – 800 °C. Temperatur pada *data logger* dicatat setiap menitnya.
5. Kemudian burner dimatikan secara perlahan dan temperatur bed akan perlahan menurun dan ditunggu hingga suhunya stabil (kondisi steady) berada diantara 700 – 750 °C. Pada temperatur ini bahan bakar cangkang kelapa maupun ranting pohon sudah dapat terbakar dengan sendirinya (self-sustained combustion). Temperatur dicatat setiap menitnya.

#### 3.3.2.2 Prosedur pengambilan data pembakaran

1. Setelah mencapai temperatur stabil tersebut, bahan bakar yang sudah disiapkan dengan sejumlah massa tertentu (0,25 kg, 0,5 kg, 0,75 hingga 2 kg) dimasukkan ke dalam ruang bakar.
2. Dimulai dari massa 0,25 kg, lalu mengamati perubahan temperatur yang terjadi dan dicatat setiap menitnya. Pada awalnya temperatur akan

menurun kemudian naik lagi dan akhirnya saat bahan bakar habis terbakar masukkan bahan bakar dengan massa 0,5 kg. Perubahan temperatur setiap menitnya dicatat dan lakukan proses yang sama hingga bahan bakar massa 2 kg.

3. Setelah semua bahan bakar tersebut dimasukkan, perubahan temperaturnya terus dicatat setiap menitnya sampai pada akhirnya suhu di ruang bakar turun terus-menerus secara perlahan karena sudah tidak dimasukkan bahan bakar lagi. Saat temperatur *bed* sudah cukup rendah sekitar 500 – 550 °C, perubahan temperatur tidak dicatat lagi.
4. Kemudian setelah suhu ruang bakar mencapai suhu ambient, langkah pemanasan awal 1-5 dan pengambilan data 1-3 diatas diulang kembali tetapi dengan flow rate udara yang berbeda (jika dilihat putarannya, yang kedua ialah 3250 rpm).



## BAB 4

### HASIL DATA DAN ANALISA

#### 4.1 Hasil

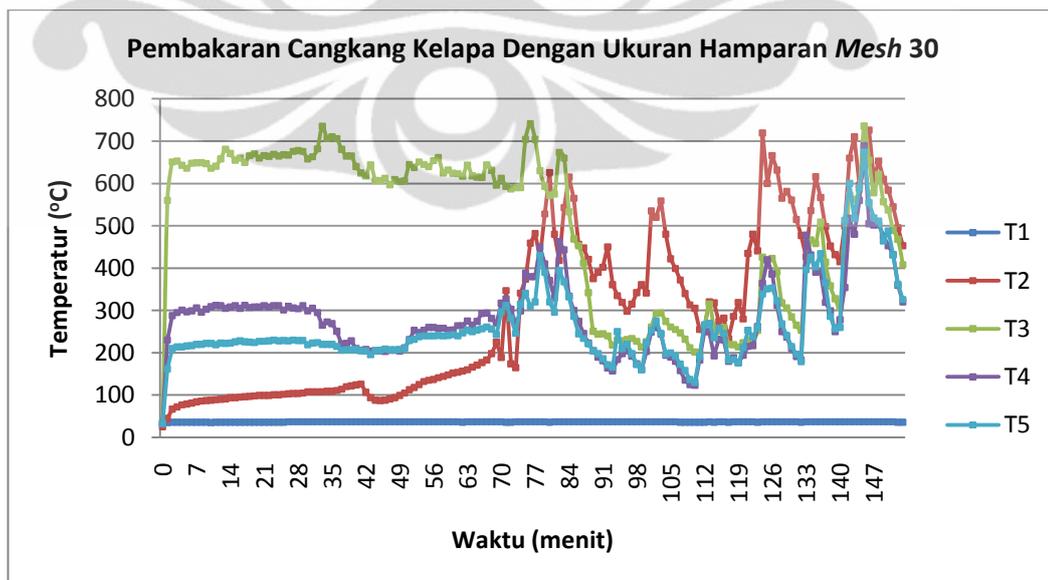
Dari percobaan yang telah dilakukan diperoleh dua hasil pembakaran yang menggunakan hampan pasir berukuran *mesh* 30 dan 40-50.

##### 4.1.1. Hasil pembakaran dengan hampan pasir *mesh* 30

Data hasil pembakaran yang digunakan adalah hasil penelitian periode sebelumnya (Desember 2010). Parameter-parameter yang digunakan dalam percobaan:

- Suplai udara blower menuju ruang bakar  $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$
- Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan nilai kalor 5780 cal/gram.
- Menggunakan hampan dengan ukuran partikel *mesh* 30
- Ketinggian Termokopel dari distributor (T2=20,5 cm; T3=41,5 cm; T4=80,5cm; T5=161,5cm)

Hasil dari pembakaran terhadap waktu percobaan disajikan dalam grafik berikut.



Gambar 4.1 Grafik pembakaran dengan ukuran hampan *mesh* 30

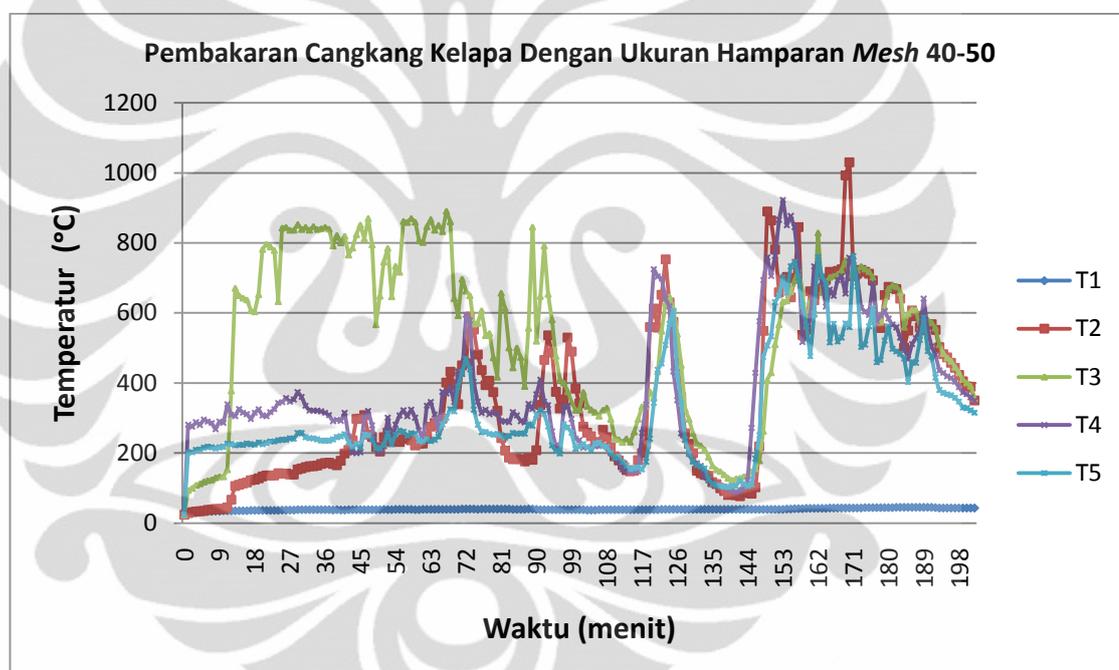
#### 4.1.2. Hasil Pembakaran dengan hamparan pasir *mesh* 40-50

Data hasil pembakaran adalah hasil dari percobaan terkini (Mei 2011).

Parameter-parameter yang digunakan dalam percobaan:

- Suplai udara blower menuju ruang bakar  $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$
- Menggunakan bahan bakar cangkang kelapa dengan nilai kalor  $5780 \text{ cal/gram}$ .
- Menggunakan hamparan dengan ukuran partikel *mesh* 40-50
- Ketinggian Termokopel dari distributor (T2= 3,5 cm; T3= 24,5 cm; T4= 63,5cm; T5= 144,5cm)

Hasil dari pembakaran terhadap waktu percobaan disajikan dalam grafik berikut.



Gambar 4.2 Grafik pembakaran dengan ukuran hamparan *mesh* 40-50

#### 4.2 Analisa

Pada percobaan yang telah dilakukan, fluidisasi yang terjadi pada hamparan dengan ukuran *mesh* 40-50 terlihat lebih baik. Hal ini berkaitan dengan ukuran partikel rata-rata hamparan pasir yang digunakan. Hamparan *mesh* 30 memiliki diameter rata-rata partikel pasir sebesar  $600 \mu\text{m}$  dan partikel *mesh* 40-50 memiliki diameter rata-rata partikel pasir sebesar  $362,5 \mu\text{m}$ . Berdasarkan perhitungan, diperoleh besar kecepatan udara minimum yang dibutuhkan untuk terjadinya fluidisasi pada hamparan pasir *mesh* 30 adalah sebesar  $0,265 \text{ m/s}$ .

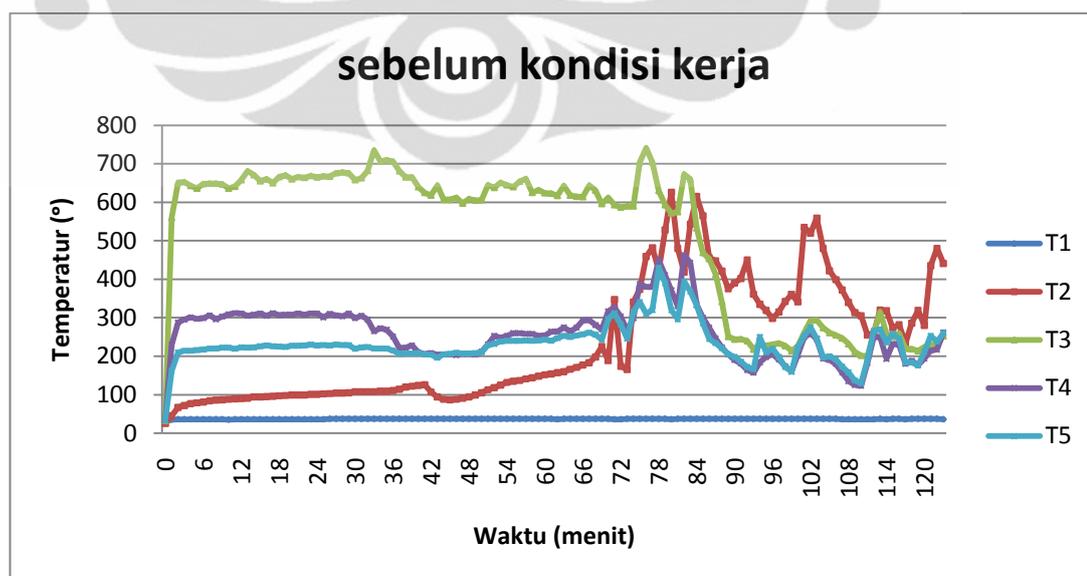
Sedangkan untuk hamparan pasir dengan ukuran *mesh* 40-50 hanya dibutuhkan kecepatan udara sebesar 0,107 m/s. Massa hamparan pasir yang digunakan untuk tiap jenis pasir ditentukan sebesar 30 kg dan suplai udara dari blower sebesar 0,095 m<sup>3</sup>/s. Pada kedua percobaan, setelah *burner* dimatikan, temperatur T2 dapat mencapai temperatur yang cukup tinggi yang memungkinkan bahan bakar yang dimasukkan dapat dengan cepat bereaksi dan terbakar, masing-masing pada menit ke 124 untuk hamparan pasir *mesh* 30 dan pada menit ke 148 untuk hamparan pasir *mesh* 40-50. Kondisi ini kemudian dianggap sebagai kondisi kerja dari FBC UI.

Analisa yang akan dilakukan dari hasil percobaan pada FBC UI meliputi :

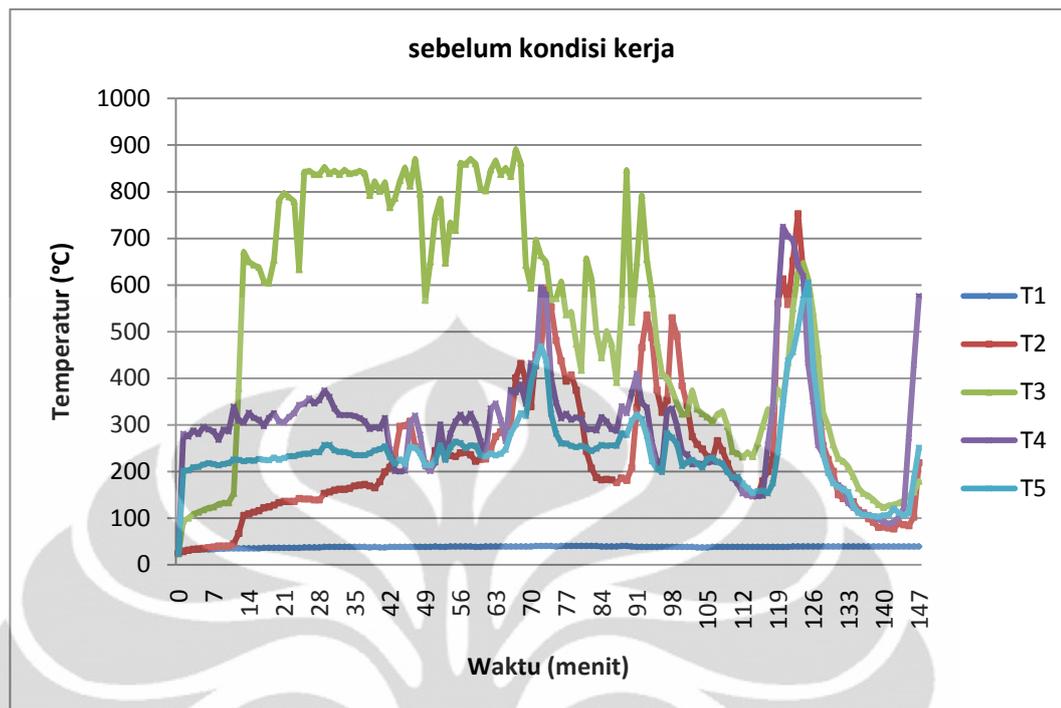
- Kondisi sebelum kondisi kerja tercapai
- Analisa kondisi kerja
- Analisa pembakaran biomassa pada kondisi kerja
- Distribusi temperatur pada kondisi kerja

#### 4.2.1 Sebelum Kondisi Kerja

Pada percobaan yang menggunakan hamparan pasir dengan ukuran partikel *mesh* 30, dibutuhkan waktu sekitar 123 menit hingga dapat mencapai kondisi kerja. Sedangkan pada percobaan yang menggunakan hamparan pasir *mesh* 40-50 kondisi kerja tercapai pada menit ke 148.



Gambar 4.3 Grafik pemanasan dengan ukuran hamparan *mesh* 30



Gambar 4.4 Grafik pemanasan dengan ukuran hamparan *mesh* 40-50

Pada percobaan dengan hamparan pasir *mesh* 40-50 distributor yang digunakan telah dinaikkan ketinggiannya sebesar 17 cm sehingga letak Termokopel T2 hanya berada 3,5 cm dari permukaan distributor. Penambahan ketinggian ini dimaksudkan agar letak termokopel T2 terletak tepat pada hamparan pasir agar pembacaan temperatur hamparan pasir menjadi lebih presisi. Karena pada percobaan sebelumnya, letak termokopel T2 terletak pada ketinggian 20,5 cm, sedangkan ketinggian hamparan pasir hanya sekitar 7,5 cm. Akibatnya menjadi sangat sulit untuk membaca perubahan temperatur pada T2 dengan tepat. Sedangkan temperatur T2 digunakan untuk melihat keadaan pencampuran dan pembakaran bahan bakar yang terjadi pada hamparan pasir.

Selain itu penambahan tinggi distributor juga dimaksudkan agar pemanasan awal menggunakan *gas burner* dapat berjalan lebih cepat. Karena letak hamparan pasir setelah distributor dinaikkan berada tepat dibawah lubang *burner* sehingga diharapkan api yang dihasilkan oleh *burner* dapat langsung mengenai hamparan pasir. Namun pada percobaan, api yang dihasilkan oleh *burner* tidak sampai mengenai hamparan pasir. Hal ini disebabkan api *burner* tertiuip oleh udara dari blower yang melewati hamparan pasir. Namun jarak antara

lidah api dengan hamparan pasir pada percobaan yang menggunakan distributor yang telah ditinggikan jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan percobaan sebelumnya.

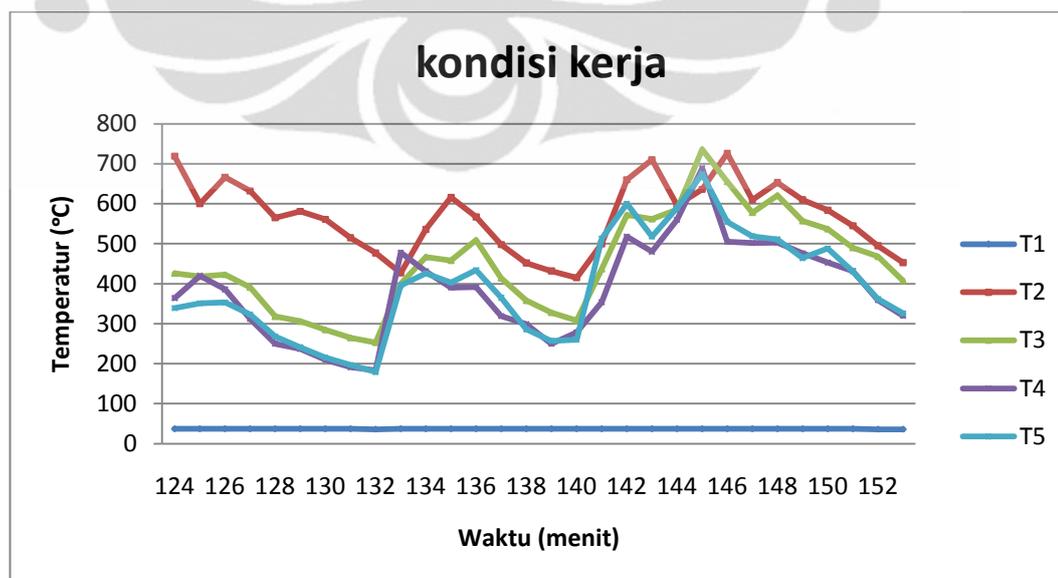
Rata-rata suhu yang dicapai selama 30 menit pertama proses pemanasan tidak terlalu berbeda jauh pada tiap percobaan yang menggunakan hamparan pasir yang berbeda. Hanya saja temperatur rata-rata T3 pada percobaan yang menggunakan hamparan pasir *mesh* 30 lebih besar dibandingkan dengan percobaan yang menggunakan hamparan pasir *mesh* 40-50. Temperatur pada T4 dan T5 pada kedua percobaan tidak terlalu jauh berbeda. Hal ini disebabkan oleh panas dari api *burner* lebih banyak mempengaruhi kedua termokopel tersebut.

Tabel 4.1 Temperatur rata-rata pemanasan 30 menit pertama

<i>mesh</i>	T1	T2	T3	T4	T5
40-50	34,63	90,2	473,06	302,6	218,03
30	35,93	89,03	635,61	294,06	215,16

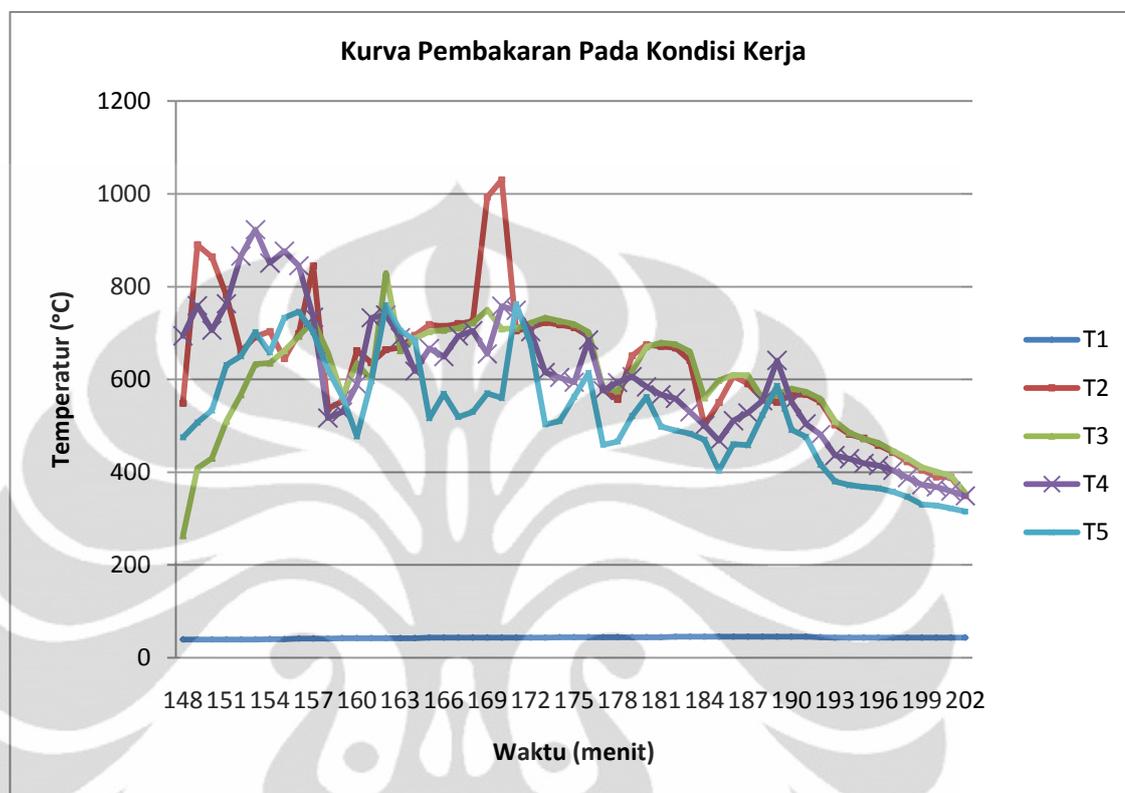
#### 4.2.2 Analisa Saat Kondisi Kerja

Pada percobaan menggunakan hamparan pasir *mesh* 30, kondisi kerja tercapai pada menit ke 124 dan seterusnya seperti yang terlihat pada grafik berikut.



Gambar 4.5 Grafik pembakaran pada kondisi kerja dengan ukuran hamparan *mesh* 30

Sedangkan pada percobaan yang menggunakan hamparan pasir *mesh* 40-50, kondisi kerja baru bisa tercapai pada menit ke 148 dan seterusnya.



Gambar 4.6 Grafik pembakaran pada kondisi kerja dengan ukuran hamparan *mesh* 40-50

Pada kondisi kerja dengan hamparan pasir *mesh* 30 dapat terlihat rata-rata temperatur kondisi operasi pada kedua percobaan adalah sebagai berikut.

Tabel 4.2 Temperatur rata-rata kondisi kerja

<i>mesh</i>	T1	T2	T3	T4	T5
40-50	42,76	631,05	596,56	603,72	525,12
30	36,9	567,9	451,13	384,7	394,8

Dari tabel di atas, terlihat bahwa rata-rata temperatur pada percobaan yang menggunakan hamparan pasir *mesh* 40-50 cenderung lebih besar dibandingkan dengan percobaan dengan menggunakan hamparan pasir *mesh* 30. Hal tersebut menunjukkan proses pembakaran selama kondisi kerja pada percobaan

menggunakan hamparan pasir dengan partikel berukuran *mesh* 40-50 lebih baik dibandingkan dengan percobaan dengan pasir berukuran *mesh* 30.



Gambar 4.7 api yang terjadi pada percobaan dengan hamparan pasir *mesh* 30



Gambar 4.8 kondisi kerja percobaan dengan hamparan pasir *mesh* 40-50

Pada percobaan menggunakan hamparan pasir *mesh* 40-50, bahan bakar terfluidisasi dengan baik dan tidak terjadi api (*flame*) yang besar seperti pada percobaan menggunakan hamparan pasir *mesh* 30. Keadaan hamparan yang terfluidisasi dengan baik memungkinkan bahan bakar (cangkang kelapa) terbakar

ketika dimasukkan, meskipun pada temperatur yang tidak terlalu tinggi. Kondisi inilah yang diharapkan terjadi pada saat kondisi kerja.

#### 4.2.3 Pembakaran biomassa pada kondisi kerja

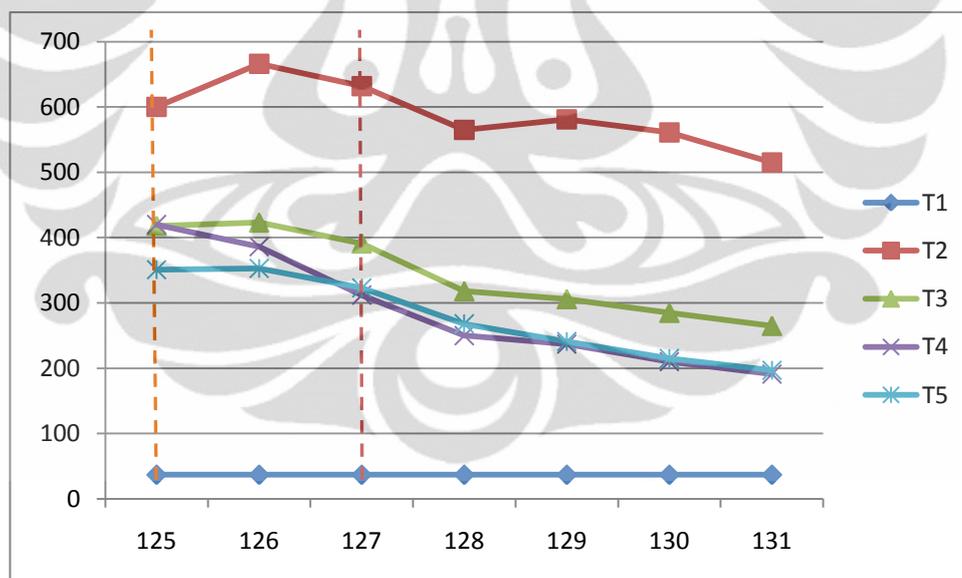
Pada bagian ini akan dianalisa mengenai pengaruh banyaknya bahan bakar yang dimasukkan pada sekali masuk terhadap perubahan temperatur. Data ini diambil pada saat kondisi dan temperatur mencapai kondisi kerja FBC di masing-masing percobaan.

##### 4.2.3.1. Pembakaran pada percobaan dengan hamparan pasir *mesh* 30

Pada percobaan ini di kondisi kerja, dilakukan percobaan dengan 1 kg, 1,25 kg dan 2 kg.

###### a. Pembakaran 1 kg

*Feeding* 1 kg tempurung kelapa dilakukan pada menit ke 125 dan 127



Gambar 4.9 grafik distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan *feeding* 1 kg

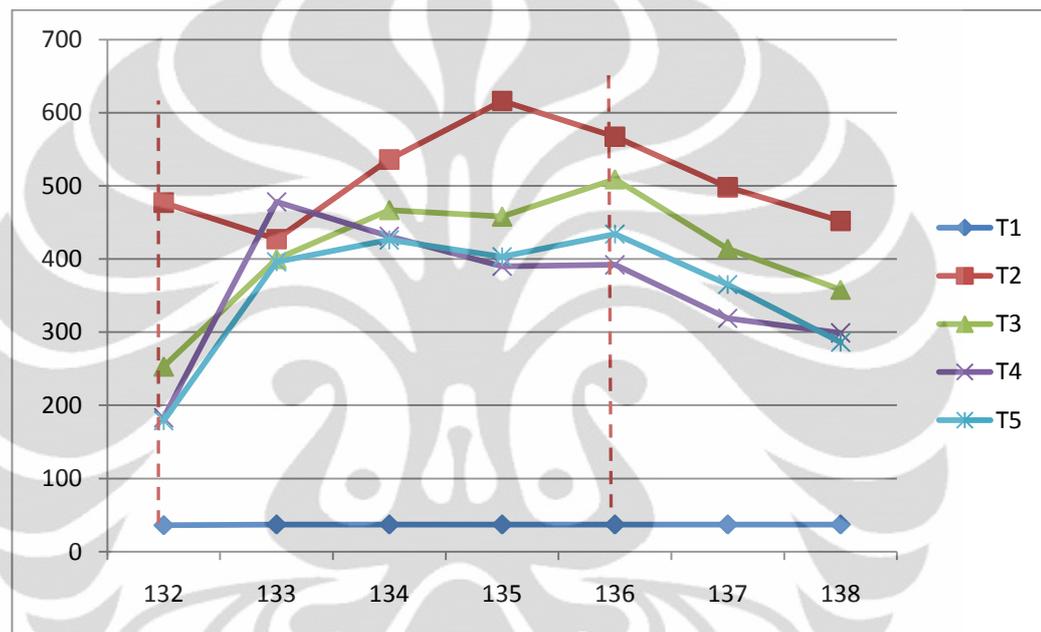
Pada *feeding* 1kg tempurung kelapa, *feeding* pertama menaikkan temperatur T2, namun tidak lama kemudian kembali turun. Pemberian *feeding* 1 kg yang kedua juga tidak dapat secara signifikan menaikkan temperatur dan cenderung terus menurun.

Tabel 4.3 Temperatur rata-rata *feeding* 1 kg

T1	T2	T3	T4	T5
37	588,57	343,71	286,57	278,29

## b. Pembakaran 1,25 kg

*Feeding* 1.25 kg tempurung kelapa dilakukan pada menit ke 132 dan 136

Gambar 4.10 distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan *feeding* 1,25 kg

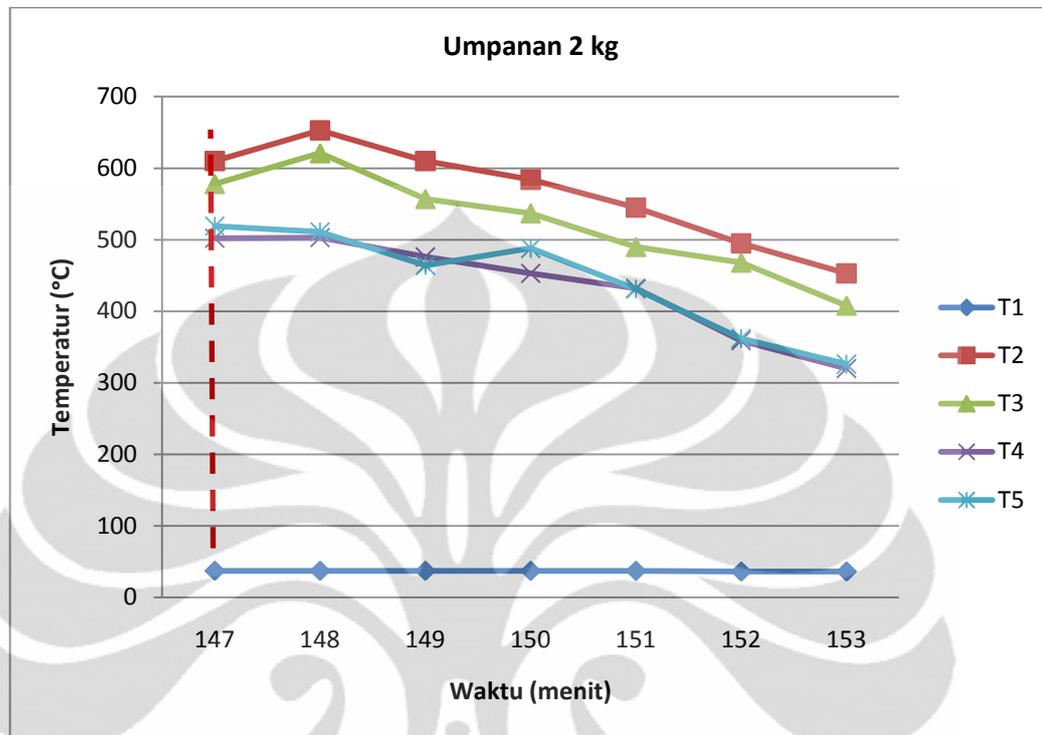
Hasil yang didapat saat *feeding* 1.25 kg yang pertama, temperatur *bed* meningkat dengan baik. Namun setelah menit ke 133 temperatur T2 kembali menurun. Pemberian *feeding* 1,25 kg yang kedua juga tidak dapat menaikkan temperatur T2 dan temperatur dalam ruang bakar cenderung menurun.

Tabel 4.4 Temperatur rata-rata *feeding* 1,25 kg

T1	T2	T3	T4	T5
36,86	510,43	408,43	356,00	355,57

## c. Pembakaran 2 kg

*Feeding* 2 kg cangkang kelapa dilakukan pada menit 147.

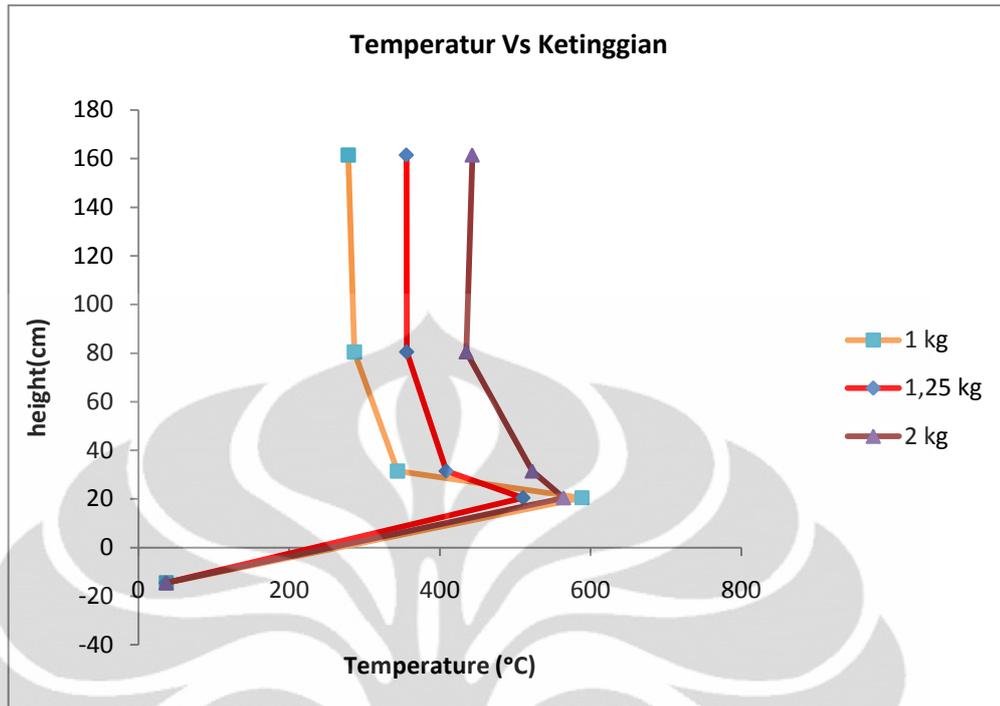


Gambar 4.11 distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan *feeding* 2 kg

Temperatur pembakaran *feeding* 2 kg pada kondisi kerja menunjukkan hasil yang kurang baik. Sesaat setelah bahan bakar dimasukkan, temperatur sempat meningkat dari temperatur 610°C hingga temperatur 653°C. Namun setelah itu, temperatur mulai menurun. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh bahan bakar 2 kg tidak dapat terfluidisasi dengan baik, sehingga cangkang kelapa menumpuk dan membutuhkan waktu yang lama untuk terbakar. Rata-rata temperatur pembakaran cangkang kelapa 2 kg dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.5 Temperatur rata-rata *feeding* 2 kg

	T1	T2	T3	T4	T5
T <sub>AVG</sub>	36,71	564,29	522,71	435,00	443,00



Gambar 4.12 distribusi temperatur terhadap ketinggian pada kondisi kerja dengan hamparan *mesh* 30

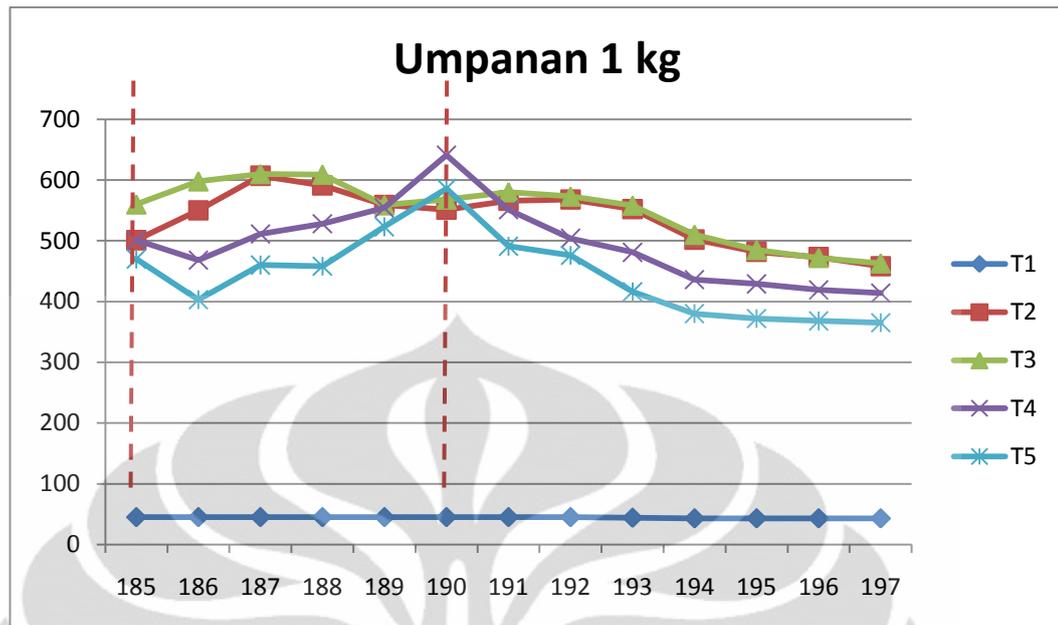
Pembakaran pada percobaan yang menggunakan hamparan pasir berukuran *mesh* 30 menunjukkan hasil yang kurang stabil. Namun melihat rata-rata temperatur yang tersebar pada beberapa ketinggian, *feeding* 2 kg tempurung kelapa menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan *feeding* 1 kg dan 1,25 kg tempurung kelapa.

#### 4.2.3.2. Pembakaran pada percobaan dengan hamparan pasir *mesh* 40-50

Pada percobaan ini di kondisi kerja, dilakukan percobaan dengan 1 kg, 1,25 kg dan 2 kg.

##### a. Pembakaran 1 kg

Pembakaran bahan bakar 1 kg ini dilakukan pada menit ke 185 dan ke 190. Grafik perubahan temperaturnya adalah sebagai berikut:



Gambar 4.13 distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan *feeding* 1 kg dengan hampan *mesh* 40-50

Pembakaran tempurung kelapa 2 kg pada kondisi kerja menunjukkan hasil yang baik. Temperatur segera naik setelah bahan bakar dimasukkan dalam ruang bakar dan dapat bertahan selama kurang lebih 4 menit sebelum akhirnya temperatur mulai perlahan menurun karena bahan bakar habis terbakar.

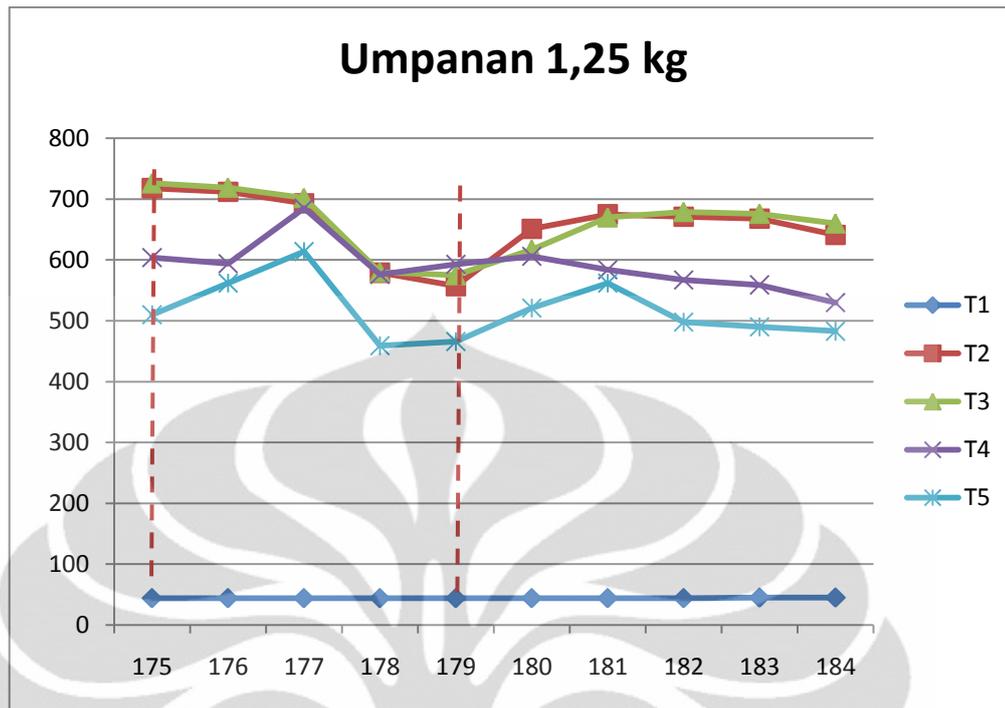
Rata-rata temperatur dari grafik di atas kemudian diterjemahkan ke dalam tabel. Tabel di bawah menunjukkan rata-rata temperatur T1 hingga T2 pada saat pembakaran umpan tersebut.

Tabel 4.6 Temperatur rata-rata *feeding* 1 kg dengan hampan *mesh* 40-50

T1	T2	T3	T4	T5
44,31	535,38	549,61	495,15	443,69

b. Pembakaran 1,25 kg

Pembakaran dengan bahan bakar sebesar 1,25 kg ini dilakukan pada menit 175 dan menit 179.



Gambar 4.14 distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan *feeding* 1,25 kg dengan hamparan *mesh* 40-50

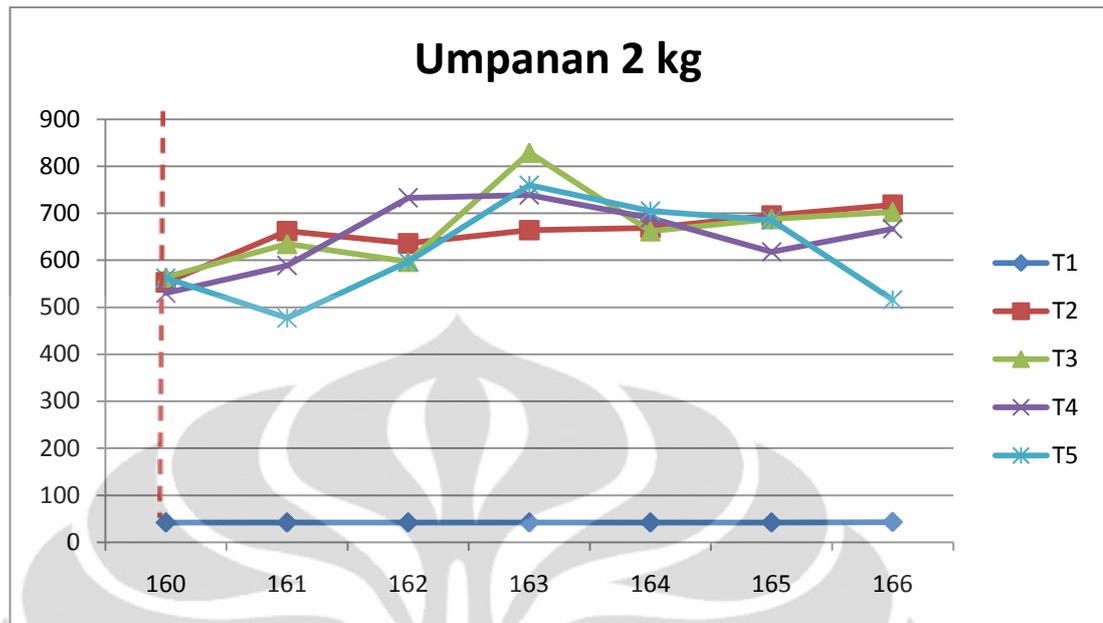
Pembakaran bahan bakar 1,25 kg juga terjadi dengan baik. Namun pada *feeding* pertama temperatur tidak langsung naik. Baru setelah *feeding* kedua temperatur kembali naik dan dapat bertahan sekitar 5 menit sebelum temperatur mulai turun.

Tabel 4.7 Temperatur rata-rata *feeding* 1,25 kg dengan hamparan *mesh* 40-50

T1	T2	T3	T4	T5
44,2	656,5	660,4	589,8	516,5

c. Pembakaran 2 kg

Pembakaran dengan bahan bakar sebanyak 2kg dilakukan pada menit ke 160. Pembakaran 2 kg bahan bakar tempurung kelapa terjadi dengan baik. Terlihat bahwa temperatur dalam ruang bakar cenderung meningkat sesaat setelah bahan bakar dimasukkan.



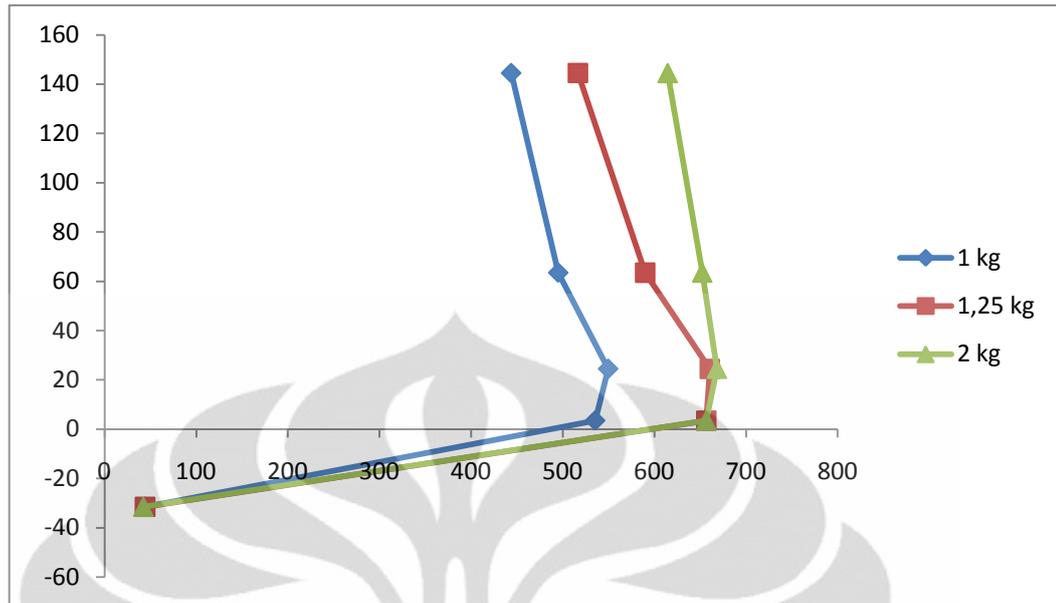
Gambar 4.15 distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan *feeding* 1,25 kg dengan hamparan *mesh* 40-50

Temperatur pembakaran relatif stabil dan dapat bertahan selam lebih dari 5 menit. Pada grafik di atas, rata-rata temperatur dari T1 hingga T5 dimasukkan ke dalam satu tabel.

Tabel 4.8 Temperatur rata-rata *feeding* 2 kg dengan hamparan *mesh* 40-50

T1	T2	T3	T4	T5
42,14286	656,7143	668,2857	652,2857	614,5714

Dari tabel rata-rata temperatur untuk bahan bakar 1 kg, 1,25kg dan 2 kg dibandingkan persebarannya terhadap tinggi termokopel. Sehingga didapatkan grafik antara persebaran temperatur pembakaran terhadap ketinggian termokopel.



Gambar 4.16 distribusi temperatur terhadap waktu kondisi kerja dengan *feeding* 1,25 kg dengan hamparan *mesh* 40-50

Terlihat dari grafik bahwa temperatur ruang bakar pada setiap ketinggian menunjukkan peningkatan yang berbanding lurus dengan jumlah bahan bakar yang dimasukkan.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari pengujian kali ini adalah:

1. Fluidisasi yang terjadi pada hampan pasir *mesh* 40-50 lebih baik dan lebih merata dibandingkan dengan hampan pasir *mesh* 30.
2. Rata-rata temperatur *bed* kondisi kerja pada percobaan dengan menggunakan hampan pasir *mesh* 40-50 lebih tinggi dibandingkan dengan percobaan dengan hampan pasir *mesh* 30 .
3. Temperatur rata-rata pada daerah *freeboard* (T4 dan T5) pada percobaan menggunakan hampan pasir dengan partikel berukuran *mesh* 40-50 lebih tinggi dibandingkan dengan percobaan menggunakan pasir ukuran *mesh* 30.
4. Pengaruh variasi massa bahan bakar (1 kg, 1,25 kg dan 2 kg) terhadap distribusi temperatur menggunakan hampan pasir *mesh* 30 menghasilkan temperatur pembakaran yang cenderung tidak stabil. Sedangkan pada percobaan menggunakan hampan pasir *mesh* 40-50, temperatur pembakaran cenderung lebih stabil. *feeding* optimal pada kedua percobaan adalah 2 kg.
5. Kondisi kerja pada percobaan menggunakan pasir berukuran *mesh* 40-50 menunjukkan hasil yang baik dengan pasir dan bahan bakar tercampur dan terfluidisasi sempurna.

Dari hasil percobaan dapat disimpulkan bahwa secara keseluruhan kinerja dari *Fluidized Bed Combustor* UI saat ini yang menggunakan hampan pasir dengan diameter pasir *mesh* 40-50 ( $d_p = 362,5\mu\text{m}$ ) lebih baik dari pada periode sebelumnya yang menggunakan hampan pasir dengan ukuran partikel *mesh* 30.

## 5.2 Saran

Agar performa *Fluidized Bed Combuster* UI dapat meningkat untuk keperluan penelitian lebih lanjut. Saya merekomendasikan beberapa hal untuk kepentingan penelitian kedepannya.

1. Persiapkan bahan bakar dengan baik (jumlah maupun ukuran) sehingga saat proses FBC berlangsung dengan baik. Pengadaan alat untuk mencacah bahan bakar harus dipertimbangkan untuk membantu persiapan bahan bakar.
2. Penambahan kapasitas burner perlu dilakukan untuk mengurangi lamanya proses pemanasan awal.
3. Perlunya pengadaan instalasi jaringan listrik untuk mendukung kebutuhan daya seluruh peralatan penunjang FBC UI dan air bersih pada laboratorium pengujian FBC. karena hal ini sangat dibutuhkan untuk praktikan laboratorium di masa mendatang.
4. Pembenahan laboratorium *Fluidized Bed Combustor* UI untuk menghindari gangguan yang diakibatkan oleh cuaca, khususnya hujan, pada saat praktikan melakukan percobaan dan menghindari kerusakan pada peralatan dan kelengkapan percobaan yang disimpan di dalam laboratorium.
5. Melakukan penghitungan daya (listrik, LPG dll) yang dibutuhkan dalam mempersiapkan FBC sebelum mencapai kondisi kerja. Kemudian bandingkan dengan daya yang didapat dari kondisi kerja FBC.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Soerodiprodjo, Soetomo. "Sistem *Fluidized Bed* Untuk Pembangkit Energi Panas." Media Teknik Edisi No: 2 Tahun VIII. 1986.
2. Howard, J. R., *Fluidized Beds – Combustion and Applications*, (London: Applied Science Publishers, 1983).
3. Surjosatyo, A; Hj Ani, Farid N; Abdullah Md Zahid. "A Study of Oil Sludge Combustion in a Bubbling Fluidized Bed Incinerator." RERIC International Energy Journal. 1999.
4. Incropera, Dewitt, Bergman, Lavine. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer: Sixth Edition."
5. Garderer, M; Gallmetzer, G; Spliethoff, H. "Biomass Fired Hot Air Gas Turbine With Fluidized Bed Combustion." Elsevier ltd. 2010.
6. Oka, Simeon N. "Fluidized Bed Combustion" (Marcel Dekker, Inc. 2004)
7. Bruce R. Munson, Donald F. Young, *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarto (Jakarta: Erlangga, 2003).
8. Surjosatyo, Adi. "Fluidized Bed Incineration of Palm Shell & Oil Sludge Waste." Thesis, Magister Engineering Program Universiti Teknologi Malaysia, 1998.
9. Sutrisno, R. Arya. "Characteristics Combustion study of Coconut Shell Biomass for University of Indonesia Fluidized Bed Combustor with Maximum Capacity." Skripsi, Program Sarjana Teknik Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010.
10. Atmaja, Anton. "Modifikasi Feeder dan Uji Pembakaran Ranting dengan Feeding Bertahap Naik pada Fluidized Bed Combustor." Thesis, Program Bachelor Degree Program Faculty of Engineering UI, Depok, 2010.
11. Darma, A.A Gde. "Pengujian Eksperimental Karakteristik Pembakaran Pada Fluidized Bed Combustor UI Menggunakan Bahan Bakar Ranting Pohon". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.

12. Lintang, Arsyah. “Perbandingan Eksperimental Pembakaran Cangkang Kelapa Dan Ranting Pohon Dengan Menggunakan Fluidized Bed Combustor”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.
13. Hartono, Rudi. “Distribusi Temperatur Pembakaran Campuran Ranting Pohon dan Cangkang Kelapa pada Fluidized Bed Combustor UI”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2009.
14. Kurnia, Reza. “Optimalisasi Operasional Fluidized Bed Combustion untuk Pembakaran Limbah Organik Pada”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2010.
15. Septian. “Optimalisasi Operasional Fluidized Bed Combustion untuk Pembakaran Limbah Organik Pada”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2010.
16. [www.cogeneration.net/fluidized\\_bed\\_combustion.htm](http://www.cogeneration.net/fluidized_bed_combustion.htm)
17. [www.doiserbia.nb.rs/ft.aspx?id=0354-98360302105G](http://www.doiserbia.nb.rs/ft.aspx?id=0354-98360302105G)
18. [www.fluidizedbedcombustion.com/](http://www.fluidizedbedcombustion.com/)

## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Data hasil percobaan

Tabel. Pembakaran Cangkang Kelapa dengan ukuran hamparan *mesh* 30

Waktu	T1	T2	T3	T4	T5	Bahan bakar
0	31	25	33	33	33	
1	35	45	560	230	162	
2	36	67	651	288	210	
3	36	72	653	295	214	
4	36	77	643	301	214	
5	36	79	636	297	216	
6	36	81	648	299	217	
7	36	84	649	306	220	
8	36	86	649	296	220	
9	36	87	647	303	222	
10	35	88	636	309	222	
11	36	89	641	312	219	
12	36	90	658	311	223	
13	36	91	681	305	222	
14	36	94	671	308	223	
15	36	94	655	311	226	
16	36	95	660	305	228	
17	36	96	650	312	226	
18	36	97	666	307	225	
19	36	98	670	308	224	
20	36	99	660	308	227	
21	36	99	666	311	227	
22	36	99	664	308	228	
23	36	101	669	311	230	
24	36	101	665	311	228	
25	36	102	668	301	229	
26	37	103	667	310	228	

27	37	104	676	306	230	
28	37	104	678	304	229	
29	37	105	676	311	229	
30	37	108	658	299	219	
31	37	108	663	305	223	+0,2 kg
32	37	108	682	295	224	
33	37	108	735	265	220	
34	37	109	706	273	220	+0,5 kg
35	37	109	710	269	220	
36	37	111	706	251	215	
37	37	114	681	221	206	
38	37	120	665	222	207	
39	37	122	665	228	207	
40	37	124	640	210	208	
41	37	126	625	206	205	0,75 kg
42	37	107	618	208	204	
43	37	94	644	204	196	
44	37	88	607	205	205	
45	37	87	607	205	206	
46	37	88	612	203	209	
47	37	91	597	206	207	
48	37	94	609	206	207	
49	37	99	605	204	208	
50	37	105	606	212	210	
51	37	113	645	231	229	
52	37	118	638	253	232	
53	37	125	651	248	238	
54	37	132	645	253	240	
55	37	135	640	260	240	
56	37	137	654	260	240	
57	37	141	661	258	241	
58	37	144	625	258	240	
59	37	148	632	253	241	
60	37	152	624	254	243	

61	37	154	623	264	240	
62	36	157	617	264	247	
63	37	160	643	275	253	
64	37	166	618	265	250	
65	37	171	615	274	254	
66	37	177	614	293	257	
67	37	183	644	294	261	
68	37	198	631	281	256	
69	37	225	596	270	243	+0,5 kg
70	37	189	612	317	297	
71	36	347	593	327	312	
72	36	174	587	303	282	
73	37	165	590	266	246	+0,75
74	37	341	590	299	315	
75	37	374	704	388	341	
76	37	459	741	380	310	
77	37	482	704	380	320	+0,75 kg
78	37	424	630	450	430	
79	37	528	593	410	390	
80	36	626	572	371	320	+1 kg
81	37	480	575	330	296	
82	37	418	673	463	394	
83	37	543	660	443	368	
84	37	615	533	334	332	burner mati
85	37	565	469	300	286	
86	37	456	453	274	245	
87	37	448	412	246	234	
88	37	421	342	223	221	
89	37	375	251	205	205	+0,25 kg
90	37	390	244	190	198	
91	37	402	245	181	186	
92	37	450	240	164	172	
93	37	361	218	157	166	+0,25 kg
94	37	335	230	184	250	

95	37	319	228	198	210	+0,25 kg
96	37	298	231	205	220	
97	37	315	234	192	198	
98	37	342	227	174	172	
99	37	361	214	160	160	+0,5 kg
100	37	341	226	203	223	
101	37	535	261	249	253	
102	37	520	293	260	275	+0,5 kg
103	37	559	294	244	246	
104	37	480	274	194	197	+0,75 kg
105	37	422	261	190	200	
106	37	399	255	180	192	
107	36	372	247	158	173	
108	36	340	232	135	158	
109	36	313	212	125	137	+0,25 kg
110	36	305	202	123	130	
111	36	255	200	183	192	+0,25kg
112	36	259	260	250	266	
113	37	320	315	250	270	
114	36	318	258	193	236	+0,5 kg
115	37	274	251	232	258	
116	37	282	260	230	246	
117	36	233	220	180	183	+0,25 kg
118	37	286	219	188	184	
119	37	319	214	177	176	+0,5 kg
120	37	280	224	194	212	
121	37	435	230	215	253	
122	37	480	230	217	238	
123	36	441	253	262	260	+0,75 kg
124	37	719	426	364	339	
125	37	600	418	420	351	+1 kg
126	37	666	423	386	353	
127	37	632	391	312	323	+1 kg
128	37	565	318	250	268	

129	37	581	306	237	241	
130	37	561	285	210	215	
131	37	515	265	191	197	
132	36	477	253	183	179	+1,25 kg
133	37	427	400	478	396	
134	37	536	467	431	426	
135	37	616	458	390	403	
136	37	567	509	392	434	+1,25 kg
137	37	498	414	319	365	
138	37	452	358	299	286	
139	37	432	328	250	257	+1,5 kg
140	37	415	308	278	260	
141	37	500	437	354	513	
142	37	660	572	518	600	
143	37	710	562	480	518	+1,75 kg
144	37	596	586	560	590	
145	37	636	736	689	674	
146	37	726	655	505	555	
147	37	610	578	502	519	+2 kg
148	37	653	621	503	511	
149	37	610	557	476	464	
150	37	584	537	453	488	
151	37	545	490	432	431	
152	36	495	468	359	362	
153	36	453	408	320	326	

Tabel. Pembakaran Cangkang Kelapa dengan ukuran hamparan *mesh* 40-50

waktu	T1	T2	T3	T4	T5	Bahan Bakar
0	28	24	24	24	24	
1	30	28	94	281	202	
2	31	31	100	275	202	
3	32	33	109	288	209	
4	32	34	113	280	210	

5	33	35	118	296	215	
6	33	37	122	290	218	
7	33	38	124	286	216	
8	34	40	130	268	213	
9	34	40	133	290	216	
10	35	40	133	286	218	
11	35	45	153	339	226	
12	35	67	378	309	225	
13	35	106	671	305	222	
14	35	109	650	326	224	
15	35	113	643	315	223	
16	35	116	638	311	227	
17	36	122	607	297	225	
18	36	124	604	315	224	
19	36	128	653	325	230	
20	36	133	782	307	225	
21	36	136	797	305	229	
22	36	136	789	317	233	
23	36	136	779	325	233	
24	36	142	633	343	236	
25	37	141	843	345	238	
26	37	141	845	357	238	
27	37	139	837	346	242	
28	37	139	837	353	241	
29	38	153	853	374	257	+0,25 kg
30	38	156	839	360	257	
31	38	160	845	335	245	
32	38	162	837	321	242	
33	38	162	847	321	242	
34	38	164	839	321	239	
35	38	169	841	319	235	
36	38	171	845	315	235	
37	38	172	840	308	235	+0,25 kg
38	37	169	792	291	239	

39	38	165	822	295	245	
40	37	178	801	292	248	
41	37	199	820	315	254	
42	38	209	766	247	231	
43	38	236	786	201	217	
44	38	297	824	200	226	
45	38	298	852	202	216	
46	38	308	812	303	253	
47	38	253	870	320	251	+0,5 kg
48	38	246	795	279	239	
49	38	217	567	211	214	
50	38	204	649	201	213	
51	39	245	746	220	223	
52	38	259	785	301	256	
53	38	232	647	228	225	
54	39	234	734	281	252	
55	39	232	717	307	264	
56	39	240	862	322	261	
57	39	241	859	305	250	
58	39	236	870	324	256	+0,75 kg
59	38	222	860	301	255	
60	38	226	807	265	235	
61	39	227	802	235	232	
62	39	248	847	335	239	
63	39	275	867	346	234	
64	39	285	837	310	238	
65	39	278	851	265	247	+0,5 kg
66	39	298	833	375	282	
67	39	401	891	370	301	
68	39	432	861	387	325	+0,75 kg
69	39	395	642	345	319	
70	39	339	593	433	389	
71	40	450	697	426	431	
72	40	457	663	595	469	

73	40	590	650	579	439	
74	40	553	569	403	324	
75	39	481	571	347	281	
76	40	437	607	314	260	
77	40	394	536	324	260	
78	40	407	542	311	255	+0,25 kg
79	40	374	473	316	252	
80	40	321	417	313	255	
81	40	243	657	290	251	
82	40	207	614	291	244	+0,5 kg
83	40	187	501	288	249	
84	39	182	444	317	257	
85	39	183	501	307	255	
86	39	182	474	291	256	
87	39	176	391	287	255	
88	40	186	557	340	282	
89	40	181	846	325	278	
90	39	208	520	368	309	
91	38	337	648	410	322	
92	38	466	792	347	312	
93	38	536	654	337	276	+0,5 kg
94	38	487	581	262	222	
95	38	375	477	222	206	
96	38	327	410	209	199	+0,25 kg
97	38	353	401	332	282	
98	38	530	376	335	273	
99	38	490	345	297	258	+0,25 kg
100	38	384	323	241	212	
101	38	342	324	237	219	
102	38	275	374	215	225	
103	37	258	334	217	217	+0,5 kg
104	37	248	324	216	208	
105	37	232	317	219	227	
106	38	227	306	221	230	

<b>107</b>	38	266	323	221	220	
<b>108</b>	38	245	329	217	217	+0,5 kg
<b>109</b>	38	217	297	202	199	
<b>110</b>	38	191	243	186	187	
<b>111</b>	38	179	239	175	189	
<b>112</b>	38	165	231	153	174	
<b>113</b>	38	151	241	149	164	
<b>114</b>	38	148	232	147	154	
<b>115</b>	38	150	261	147	158	
<b>116</b>	38	180	297	148	159	
<b>117</b>	38	200	333	257	153	
<b>118</b>	38	225	335	338	175	+0,75 kg
<b>119</b>	38	560	376	563	241	
<b>120</b>	38	613	359	725	344	
<b>121</b>	38	558	433	704	438	
<b>122</b>	39	652	549	698	456	
<b>123</b>	39	753	629	641	509	+0,75 kg
<b>124</b>	39	630	647	619	569	
<b>125</b>	39	574	614	433	606	
<b>126</b>	39	455	540	351	425	
<b>127</b>	39	360	451	256	341	
<b>128</b>	39	256	326	237	239	+0,75 kg
<b>129</b>	39	226	297	201	197	
<b>130</b>	39	200	257	178	175	
<b>131</b>	39	150	228	171	166	
<b>132</b>	39	142	222	163	161	
<b>133</b>	39	138	210	132	156	
<b>134</b>	39	135	189	122	125	
<b>135</b>	39	117	164	115	111	
<b>136</b>	39	111	153	110	107	
<b>137</b>	39	99	148	107	106	
<b>138</b>	39	91	139	103	104	
<b>139</b>	39	80	129	97	103	
<b>140</b>	39	81	123	92	106	

<b>141</b>	39	79	127	88	106	
<b>142</b>	39	77	129	91	121	
<b>143</b>	39	89	133	102	111	
<b>144</b>	39	86	138	122	106	
<b>145</b>	39	84	148	272	110	
<b>146</b>	39	102	156	429	184	+0,5 kg
<b>147</b>	39	219	179	576	251	
<b>148</b>	39	549	263	694	475	
<b>149</b>	39	890	409	759	507	+1,25 kg
<b>150</b>	39	864	430	706	533	
<b>151</b>	39	781	510	763	631	
<b>152</b>	39	659	567	866	650	+1,25 kg
<b>153</b>	39	692	633	923	702	
<b>154</b>	40	703	635	851	658	
<b>155</b>	40	645	662	877	733	+1,25 kg
<b>156</b>	41	699	693	845	746	
<b>157</b>	41	845	727	734	702	
<b>158</b>	41	537	657	517	621	
<b>159</b>	42	553	564	530	562	+2kg
<b>160</b>	42	662	635	589	477	
<b>161</b>	42	636	597	733	597	
<b>162</b>	42	664	829	739	760	
<b>163</b>	42	669	662	690	705	
<b>164</b>	42	695	688	618	685	
<b>165</b>	43	718	703	667	516	
<b>166</b>	43	714	706	649	569	+0,25 kg
<b>167</b>	43	720	711	694	519	
<b>168</b>	43	725	722	705	530	
<b>169</b>	43	993	750	655	570	
<b>170</b>	43	1030	709	758	560	
<b>171</b>	43	705	710	749	762	
<b>172</b>	43	712	722	703	676	
<b>173</b>	43	723	733	615	503	
<b>174</b>	44	718	726	604	510	+1,25 kg

<b>175</b>	44	712	719	594	562	
<b>176</b>	44	693	702	685	614	
<b>177</b>	44	579	580	576	459	
<b>178</b>	44	557	575	593	466	+1,25 kg
<b>179</b>	44	651	617	606	521	
<b>180</b>	44	675	670	584	562	
<b>181</b>	44	671	679	567	498	
<b>182</b>	45	668	676	559	490	
<b>183</b>	45	641	660	530	483	
<b>184</b>	45	501	560	501	470	+1 kg
<b>185</b>	45	550	598	468	403	
<b>186</b>	45	607	610	511	460	
<b>187</b>	45	591	609	528	458	
<b>188</b>	45	559	559	554	523	
<b>189</b>	45	551	568	641	586	+1 kg
<b>190</b>	45	566	580	551	491	
<b>191</b>	45	568	573	504	476	
<b>192</b>	44	552	558	481	416	
<b>193</b>	43	502	510	436	380	
<b>194</b>	43	482	485	429	372	
<b>195</b>	43	473	472	419	368	
<b>196</b>	43	458	463	414	365	
<b>197</b>	43	443	446	404	358	
<b>198</b>	43	423	430	388	347	
<b>199</b>	43	405	411	373	330	
<b>200</b>	43	390	401	368	328	
<b>201</b>	43	389	392	359	322	
<b>202</b>	43	350	355	349	315	

## Lampiran 2. Perhitungan kecepatan fluidisasi minimum

$$U_{mf} = \frac{Re_{mf} \mu_f}{\bar{d}_p \rho_f}$$

Diameter partikel rata-rata (  $d_p$  ) = 0,0003625 m

### Fluida udara pada kondisi ambien ( $T = 27^\circ C$ )

Massa jenis udara (  $\rho_f$  ) = 1,179766047 kg/m<sup>3</sup>

Viskositas udara (  $\mu_f$  ) = 0,000018199 N.s/m<sup>2</sup>

### Fluida udara pada kondisi operasi ( $T = 800^\circ C$ )

Massa jenis udara (  $\rho_f$  ) = 0,328441282 kg/m<sup>3</sup>

Viskositas udara (  $\mu_f$  ) = 4,09064E-05 N.s/m<sup>2</sup>

$$Re_{mf} = (1135,7 + 0,0408 \cdot Ar)^{1/2} - 33,7$$

Dengan

$$Ar = \frac{\bar{d}_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2}$$

=     ▪ pada kondisi ambien

$$Ar = 4328$$

▪ pada kondisi operasi

$$Ar = 239$$

Sehingga didapat bilangan  $Re_{mf}$ :

▪ pada kondisi ambien

$$U_{mf} = 0,107 \text{ m/s}$$

▪ pada kondisi operasi

$$U_{mf} = 0,050 \text{ m/s}$$